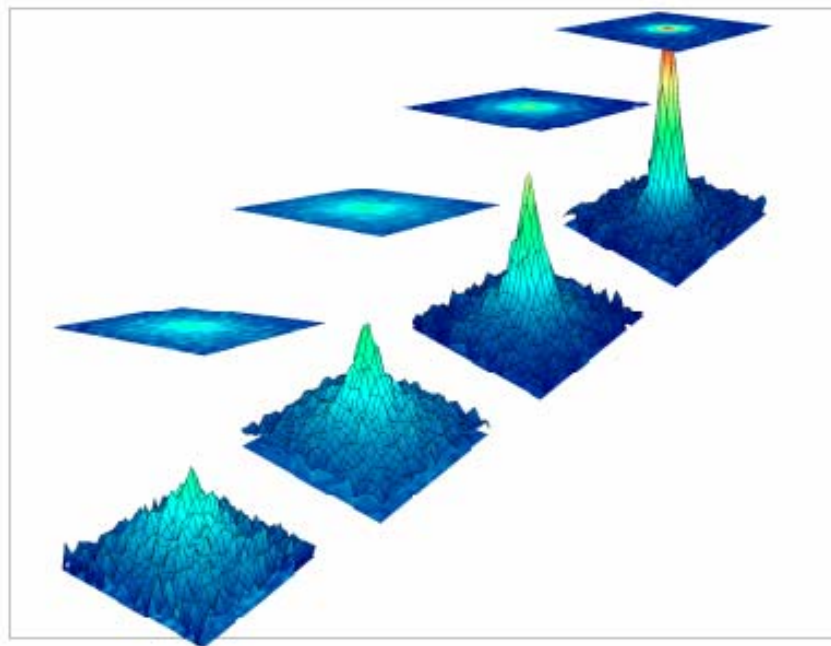




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

*Απλοποίηση της εκτίμησης της εξατμοδιαπνοής στην
Ελλάδα*



Μεταπτυχιακή εργασία: Αριστοτέλης Τέγος

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2007

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ΙΠΙΑΣ για την συνεργασία τους σε όλα τα επίπεδα, για τη φιλία τους και το καλό κλίμα όλα αυτά τα χρόνια. Ειδικότερα για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας συνέβαλαν:

Ο Λέκτορας Νίκος Μαμάσης, με την παροχή των υδρομετεωρολογικών δεδομένων, την βοήθεια στα Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας, την συνολική υποστήριξη του σε όλα τα στάδια.

Ο Διδάκτωρ Στέφανος Κοζάνης με την απλόχερη βοήθεια του στο πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ και σε ένα σημείο των επεξεργασιών, όπου έκανα λάθος στην μετατροπή των μονάδων και τον εξανάγκασα να ξενυχτήσει.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή Δημήτρη Κουτσογιάννη, αφού τον αποκαλώ δάσκαλό, δεν αρκεί να τον ευχαριστήσω.

Την προσωπική μου δουλειά που σκοπό έχει να διευκολύνει τη δουλειά των τεχνικών επιστημόνων που ασχολούνται με ζητήματα διαχείρισης των υδατικών πόρων, την αφιερώνω σε αυτούς που δυσκολεύτηκαν όλα αυτά τα χρόνια, δηλαδή τους γονείς μου.

Άρης Τέγος
Ιούνης 2007

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περιεχόμενα	3
Περίληψη	5
Abstract	6
Extended summary	7
1 Εισαγωγή	12
1.1 Αντικείμενο της εργασίας.....	12
1.2 Διάρθρωση της εργασίας.....	12
2 Η έννοια της εξατμοδιαπνοής	14
2.1 Βασικές έννοιες- Ορισμοί.....	14
2.1.1 Η έννοια της εξάτμισης.....	14
2.1.2 Η έννοια της διαπνοής.....	14
2.1.3 Η έννοια της εξατμοδιαπνοής.....	15
2.2 Ενεργειακό ισοζύγιο και εξάτμιση.....	15
2.3 Μεταφορά μάζας και εξάτμιση.....	16
2.4 Βασικές μεταβλητές για την εκτίμηση της εξάτμισης.....	17
2.5 Τεχνολογίες μέτρησης της εξάτμισης.....	20
3 Υπολογισμός εξάτμισης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής	22
3.1 Η μέθοδος Penman.....	22
3.2 Η μέθοδος Penman- Monteith.....	22
3.3 Η μέθοδος Doorenbos-Pruit.....	23
3.4 Απλοποιήσεις των μεθόδων συνδυασμού.....	23
4 Εμπειρικά μοντέλα	26
4.1 Η μέθοδος Thornthwaite.....	26
4.2 Η μέθοδος Hargreaves.....	26

4.3	Η μέθοδος Blaney- Criddle	27
5	Ανάπτυξη μοντέλου	28
5.1	Η σχέση εξάτμισης-θερμοκρασίας-ακτινοβολίας.....	28
5.2	Η διατύπωση του μοντέλου	30
5.3	Μεθοδολογία προσαρμογής	31
6	Δεδομένα και επεξεργασίες	34
6.1	Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες	34
6.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	37
7	Αποτελέσματα	42
7.1	Σύγκριση με άλλες σχέσεις εξωγήινης ακτινοβολίας.....	42
7.2	Σύγκριση με εμπειρικές μεθόδους.....	43
8	Γεωγραφική παρεμβολή παραμέτρων	45
8.1	Μέθοδοι παρεμβολής σε Σ.Γ.Π.....	45
8.2	Μεταβολή παραμέτρου a.....	46
8.3	Μεταβολή παραμέτρων a, c.....	48
9	Συμπεράσματα	53
	Βιβλιογραφία	55
	Παράρτημα	57

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής. Το νέο μοντέλο βασίζεται στη διατύπωση μιας παραμετρικής εξίσωσης, που προσαρμόζεται σε ένα δείγμα υπολογισμένης δυνητικής εξατμοδιαπνοής κατά Penman-Monteith. Η προσαρμογή γίνεται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και το νέο μοντέλο απαιτεί για δεδομένα εισόδου τη μέση θερμοκρασία και την εξωγήινη ακτινοβολία, εκ των οποίων μόνο η θερμοκρασία χρειάζεται να μετρηθεί. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε 37 μετεωρολογικούς σταθμούς της Ελλάδας για τις περιόδους 1968-83 και 1984-1989 σε μηνιαίο χρονικό βήμα. Η πρώτη περίοδος είναι η περίοδος βαθμονόμησης και η δεύτερη η περίοδος επαλήθευσης του μοντέλου, όπου ελέγχεται η προγνωστική ικανότητα του. Μέσω βελτιστοποίησης μειώθηκαν οι παράμετροι του αρχικού παραμετρικού μοντέλου με σκοπό την απλοποίηση της μαθηματικής του έκφρασης. Τα αποτελέσματα κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Τέλος, πραγματοποιήθηκε γεωγραφική παρεμβολή των παραμέτρων με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικής Πληροφορίας, για την εξαγωγή τους σε όλο τον Ελλαδικό χώρο.

Abstract

The scope of the study is the development of a new model, in order to estimate the potential evapotranspiration. The new model is based on the formulation of a parametric equation, that is adapted in a sample calculated at Penman- Monteith data. The adaptation becomes with the method of minimal square and the new model requires the medium temperature and the extraterrestrial radiation, as entry data, which only the temperature needs to be measured. The model was applied in 37 meteorological stations of Greece for the periods 1968-1983 and 1984-1989, in monthly step. The first decade refers to the calibration period, whereas the second one is the validation period, in which the forecasting capacity of the model was tested. Through optimization the initial parameters were reduced, so as to simplify the mathematic equation. The results were particularly satisfactory. Finally, geographic interpolation of parameters was realized, with the use of G.I.S, on the inference of parameters in all the Hellenic space.

Extended summary

The scope of this particular thesis is the development of a new model concerning the estimation of potential evapotranspiration. Evaporation and evapotranspiration constitute the main components of the hydrological cycle and their estimation demands a number of hydrometeorological data. The method, which describe with accuracy the phenomenon is Penman- Monteith's method of combination, while for its assessment the average temperature, relative humidity, sunshine and wind's velocity are demanded. The simultaneous existence of these four measurements is quite often absent from meteorological stations and a number of experts, due to complexity of the methods, looked for simplified mathematical expressions so as to describe the phenomenon.

International bibliography recommends a breadth of mathematical equations, that whether rely upon the simplification of the methods or originate from empirical observations and mainly inquire temperature as entry data.

In the specific thesis, it is given an account of a new parametrical equation that relies on adaptation, depending on the method of minimal square, in a measured sample according to Penman-Monteith's method. The mathematical equation is described through this analogy.

$$E = \frac{aS_o - b}{1 - cTa}$$

a,b,c: Parameters which are calculated through the method of minimal square

So: The extraterrestrial radiation that can be easily calculated

Ta: The average temperature

This new analogy was applied in 37 meteorological stations in Greece (Figure 1) from 1/1968 to 12/1989, in monthly step. The results are satisfactory enough, as high applications measures, concerning the data of the stations, appear.

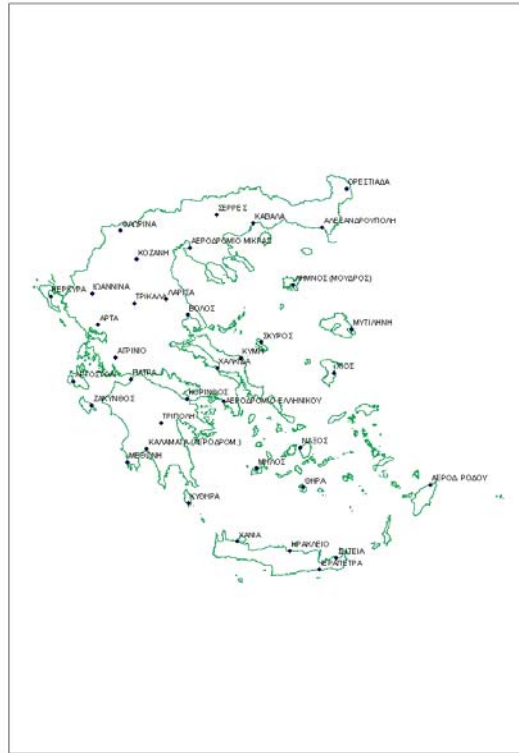


Figure: Meteorological station

The initial parametrical equation, which was formulated, was further simplified into one, defining as a result an analogy optimization and the final form of the equation is the following:

$$E = \frac{aS_0}{1 - 0.02344T} \quad (2)$$

Moreover, a bibliographical review, concerning the main evaluation methods of potential evapotranspiration took place and by comparing the results with the new parametrical equation, we observe that they are close to that of Penman-Monteith's method.

The final part of the thesis deals with a geographical interpolation of the parameters, so as to infer the parameters all over the Greek region and the potentiality of using widely the new parametrical equation. The geographical interpolation, with the use of G.I.S, becomes with the deterministic method of Inverse Weight Distance.

On the one hand, in figure 2 it is depicted the modification of parameter a concerning the parametrical equation 2, while on the other hand the territorial modification of a, c parameters, referring to the mathematical form of the equation is presented:

$$E = \frac{aS_0}{1 - cT} \quad (3)$$

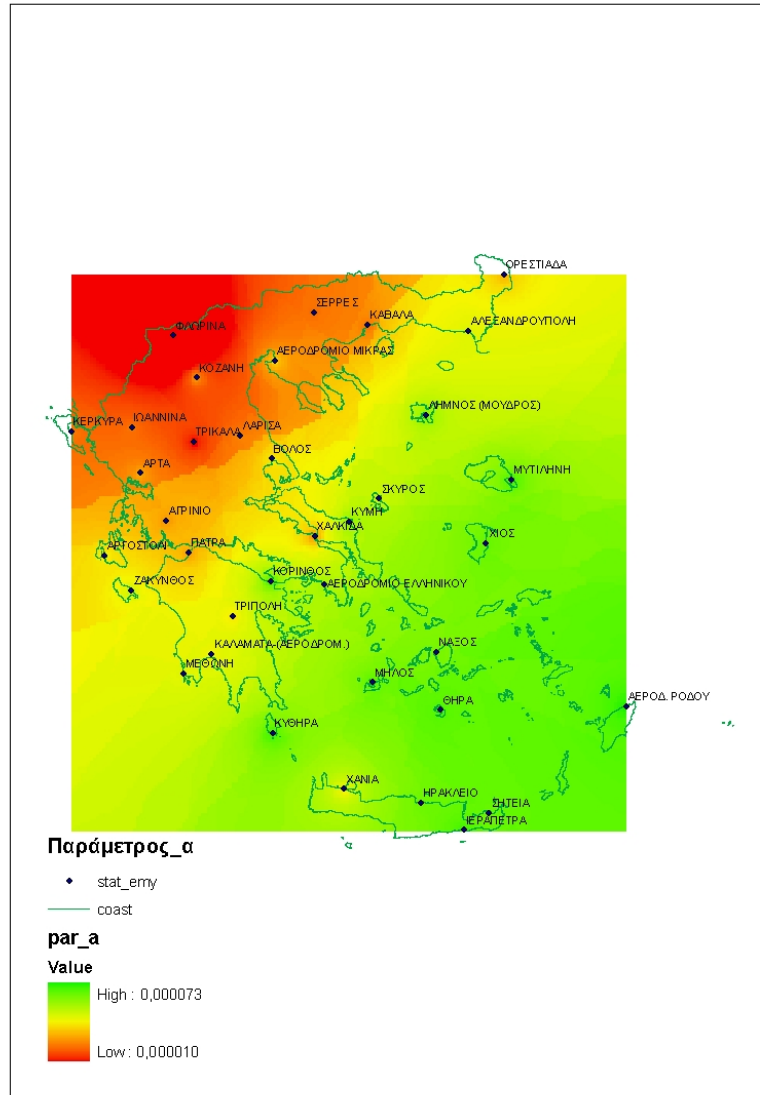


Figure 2: Geographical interpolation of parameter a for the equation 2

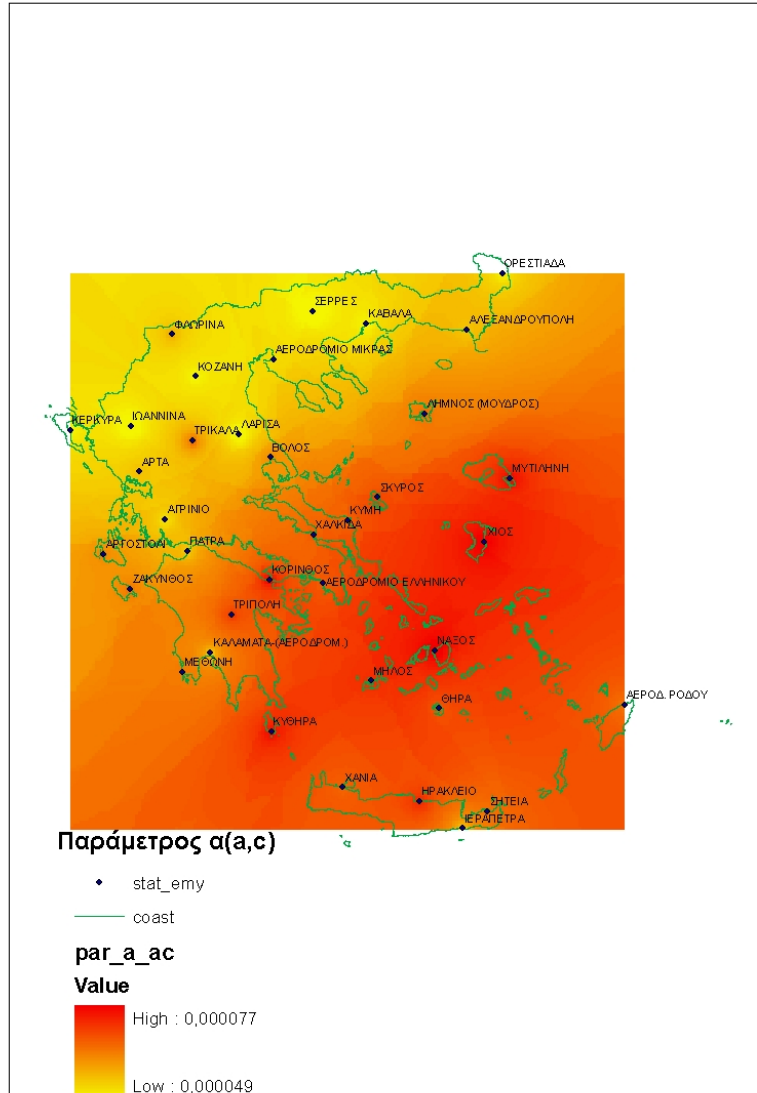


Figure 3: Geographical interpolation of parameter a for the equation 3

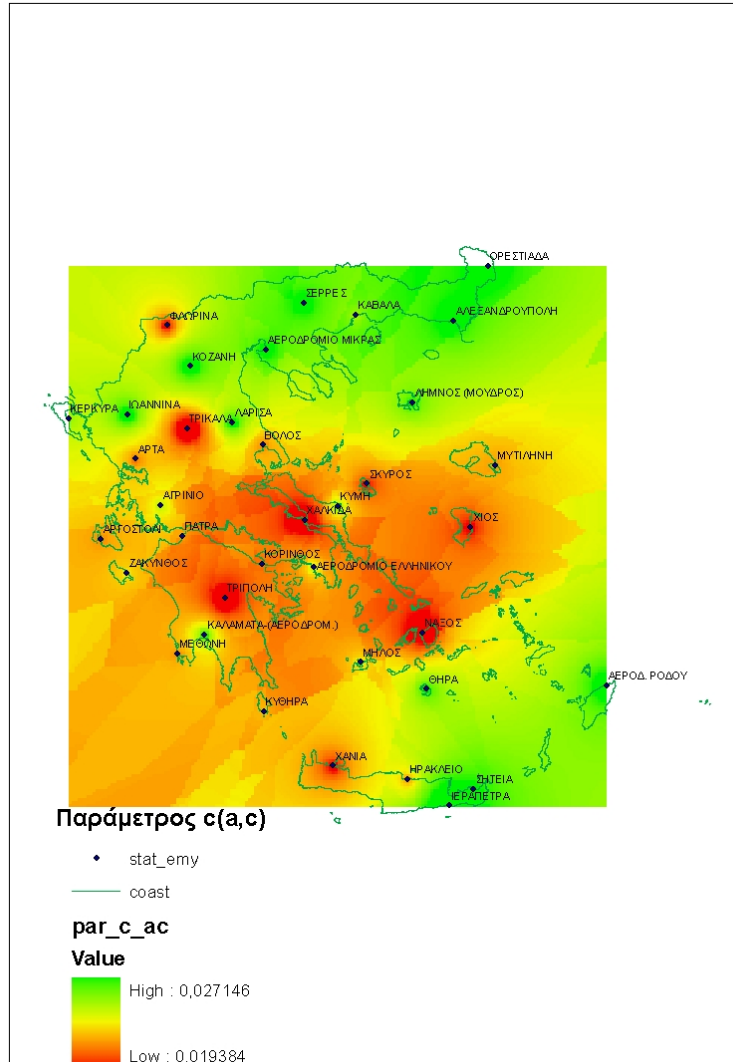


Figure 4: Geographical interpolation of parameter c for the equation 3

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Η μεταπτυχιακή εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο την ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής. Η εξατμοδιαπνοή είναι μία βασική διεργασία του υδρολογικού κύκλου και η εκτίμηση της είναι πολύ σημαντική για πλήθος τεχνικών εφαρμογών όπως το υδρολογικό ισοζύγιο, η εκτίμηση των υδατικών αναγκών και η εκτίμηση των απωλειών από ταμειυτήρες και άλλες. Όμως υπολογίζεται δύσκολα, καθώς απαιτεί πολλά πρωτογενή δεδομένα για την συνεπή εκτίμηση της.

Στην εργασία αναπτύσσεται ένα νέο παραμετρικό μοντέλο που βασίζεται στην προσαρμογή σε ένα δείγμα αναφοράς δυνητικής εξατμοδιαπνοής κατά Penman-Monteith και τα απαιτούμενα εισερχόμενα δεδομένα είναι η μηνιαία θερμοκρασία και η εξωγήινη ακτινοβολία, εκ των οποίων μόνο η θερμοκρασία χρειάζεται να μετρηθεί. Η μέθοδος Penman-Monteith θεωρείται η εγκυρότερη διεθνώς για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής και το μοναδικό της μειονέκτημα είναι η απαίτηση σε πολλά πρωτογενή δεδομένα (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ηλιοφάνεια και ταχύτητα ανέμου). Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε 37 σταθμούς της Ελλάδας, που είχαν όλα τα απαιτούμενα δεδομένα για την εφαρμογή της Penman-Monteith και συγκρίθηκε και με άλλες απλοποιημένες εκδοχές της καθώς και με εμπειρικές μεθόδους και τα αποτελέσματα κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Τέλος πραγματοποιήθηκε γεωγραφική παρεμβολή των παραμέτρων σε Σ.Γ.Π για τη δυνατότητα εφαρμογή της νέας σχέσης σε όλο τον Ελλαδικό χώρο.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία αποτελείται από την εισαγωγή, 7 κεφάλαια και ένα παράρτημα. Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εισαγωγικές έννοιες της εξάτμισης και της διαπνοής, το φυσικό πλαίσιο εκτίμησης τους και οι μέθοδοι μέτρησης της εξάτμισης και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι συνδυασμού για την μέτρηση της εξάτμισης και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής που είναι η Penman και η Penman-Monteith αντίστοιχα. Ακόμη παρουσιάζονται και απλοποιήσεις των μεθόδων συνδυασμού.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εμπειρικές μέθοδοι για την εκτίμηση της εξάτμισης και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής, που αναπτύχθηκαν με βάση εμπειρικές μετρήσεις και με σκοπό την εξαγωγή της εξάτμισης κυρίως μέσω της μέσης θερμοκρασίας.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρητική τεκμηρίωση του νέου μοντέλου η μαθηματική του έκφραση καθώς και η μεθοδολογία προσαρμογής στο «μετρημένο» ιστορικό δείγμα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επεξεργασίες που πραγματοποιήθηκαν για τα δεδομένα των 37 μετεωρολογικών σταθμών της χώρας μας και εξάγονται οι παράμετροι του προτεινόμενου μοντέλου.

Στο 7^ο κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων με απλοποιήσεις των μεθόδων συνδυασμού που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία καθώς και με εμπειρικές μεθόδους.

Στο 8^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η γεωγραφική παρεμβολή των παραμέτρων σε Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας, επιλέγεται η μέθοδος παρεμβολής και παρουσιάζονται οι χάρτες και τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους των παραμέτρων για τη δυνατότητα χρήσης του νέου μοντέλου σε όλη την ελληνική επικράτεια.

Στο 9^ο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται η σύνοψη των εργασιών και των βασικών συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας.

Στο παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του νέου μοντέλου για 34 μετεωρολογικούς σταθμούς.

2 Η έννοια της εξατμοδιαπνοής

Η διεργασία της εξάτμισης έχει απασχολήσει από την αρχαιότητα τους φιλοσόφους. Εμφανίζεται στα κείμενα αρκετών αρχαίων ελλήνων φιλόσοφων (Αναξίμανδρος, Αριστοτέλης, Θεοφραστός) και μάλιστα η εξήγηση που δίνουν σε αυτό το φυσικό φαινόμενο δεν απέχει από την σύγχρονη επιστημονική οπτική (Koutsoyiannis *et al.*, 2006). Στην εξέλιξη της γνώσης και της επιστήμης η θεωρητική και φιλοσοφική θεμελίωση των φυσικών εννοιών έγινε για την αξιοποίηση τους σε πρακτικό καθημερινό πεδίο.

Το πρόβλημα της εκτίμησης της ζήτησης νερού για άρδευση μελετάται επιστημονικά από το 1890. Οι πρώτες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Colorado και τη Utah (Jensen *et al.*, 1963). Μια «κλασική»- εργασία για την διαπνοή διατυπώθηκε το 1916 από τους Brigs και Shantz που αναγνώρισαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία παίζει βασικό ρόλο στην διαπνοή καθώς και ότι η ενέργεια προσλαμβάνεται από τον αέρα. Την περίοδο 1940-45 έμφαση δόθηκε στην ανάπτυξη μοντέλων για την εκτίμηση της εποχιακής εξατμοδιαπνοής με βασικό κλιματικό δεδομένο την θερμοκρασία. Μετά το 1950 ερευνήθηκε σε θεωρητικό επίπεδο το φυσικό πεδίο του φαινομένου που βασίζεται στην μεταφορά μάζας καθώς και το ενεργειακό ισοζύγιο. Οι έρευνες πραγματοποιήθηκαν πρώτα για εξάτμιση από υδάτινη επιφάνεια και στη συνέχεια επεκτάθηκε στην εξατμοδιαπνοή. Σημαντική σ' αυτό ήταν η συμβολή του Penman (1948) που κατάφερε να συνδυάσει την εξίσωση μεταφοράς και την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου.

2.1 Βασικές έννοιες- Ορισμοί

2.1.1 Η έννοια της εξάτμισης

Ο όρος εξάτμιση (evaporation) χρησιμοποιείται στην υδρολογία για να περιγράψει τόσο φαινομενολογικά όσο και ποσοτικά, τη μετατροπή του νερού από την υγρή στην αέρια φάση (υδρατμοί). Ο φυσικός ρυθμός καθορίζεται από τρεις θεμελιώδεις παράγοντες:

- Τη φυσική διαθεσιμότητα (παρουσία) του νερού σε υγρή φάση,
- Τη διαθεσιμότητα ενέργειας στην επιφάνεια του νερού για την πραγματοποίηση της εξάτμισης.
- Την ευκολία με την οποία διαχέονται οι υδρατμοί στην ατμόσφαιρα

2.1.2 Η έννοια της διαπνοής

Ο όρος διαπνοή (transpiration) περιγράφει τη μετατροπή του νερού σε υδρατμούς που πραγματοποιείται στους πόρους της χλωρίδας και ιδίως των φυλλωμάτων των φυτών. Το νερό των φυτών απορροφάται από το έδαφος μέσω των ριζών και, μέσω του αγγειακού συστήματος, οδηγείται στους πόρους των φυλλωμάτων, γνωστούς ως στόματα, απ' όπου διαπνέεται. Η βασική διαφορά της διαπνοής από την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες ή

βρεγμένο έδαφος, έγκειται στο γεγονός ότι τα κύτταρα των φυτών ελέγχουν το ρυθμό διαπνοής, μέσω της ρύθμισης των ανοιγμάτων των στομάτων.

2.1.3 Η έννοια της εξατμοδιαπνοής

Με τον όρο εξατμοδιαπνοή καλούμε το σύνολο των απωλειών νερού από την εξάτμιση εδαφών και από τη διαπνοή της χλωρίδας. Η ποσότητα της εξατμοδιαπνοής που πραγματοποιείται από εδαφικές επιφάνειες, πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες από αναπτυσσόμενη χλωρίδα, κάτω από συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού ονομάζεται δυναμική εξατμοδιαπνοή. Η πραγματική εξατμοδιαπνοή είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με τη δυναμική εξατμοδιαπνοή. Η εξατμοδιαπνοή, δυναμική ή πραγματική, εξαρτάται από το είδος της φυτοκάλυψης και τα χαρακτηριστικά της (ύψος, φύλλωμα, στάδιο ανάπτυξης κ.α). Για λόγους τυποποίησης των υπολογισμών έχει εισαχθεί η έννοια της εξατμοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς, η οποία ορίζεται κατ' αρχήν ως η εξατμοδιαπνοή από μια ιδεατή εκτεταμένη επιφάνεια καλυμμένη πλήρως από ομοιόμορφη χαμηλού ύψους χλόη που σκιάζει πλήρως το έδαφος και βρίσκεται σε συνθήκες ενεργού ανάπτυξης χωρίς έλλειψη νερού.

2.2 Ενεργειακό ισοζύγιο και εξάτμιση

Η πλήρης εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου σε μία μοναδιαία επιφάνεια αναφοράς στη γη δίνεται από τη σχέση:

$$Rn = H + \Lambda + G + Q_B + Q_s + Q_h \quad (2.2.1)$$

όπου

H: Αισθητή θερμότητα

Λ : Λανθάνουσα θερμότητα

G: Διακίνηση ενέργειας με αγωγή προς το έδαφος

Q_B : Ενέργεια που δαπανάται για τις βιοχημικές διεργασίες των φυτών

Q_s : Προσωρινή αποθήκευση ενέργειας

Q_h : Ενέργεια που μεταφέρεται οριζόντια προς άλλες περιοχές

Στην πράξη οι τέσσερις τελευταίοι όροι της εξίσωσης 2.2.1 μπορούν να θεωρηθούν αμελητέοι όποτε η εξίσωση παίρνει τη μορφή

$$Rn \approx A = H + \Lambda \quad (2.2.2)$$

Η ολική καθαρή ενέργεια Rn ($kJ/(m^2d)$) μπορεί να προσδιοριστεί με σχετική ακρίβεια το σημαντικό πρόβλημα προκύπτει από τον επιμερισμό του Rn στους όρους H και Λ . για την άρση του προβλήματος επιχειρείται να προσδιοριστεί ο λόγος της αισθητής προς την λανθάνουσα θερμότητα γνωστός ως λόγος Bowen:

$$B = \frac{H}{\Lambda} \quad (2.2.3)$$

Αν προσδιοριστεί ο όρος Λ , τότε η εξάτμιση εκφρασμένη σε όρους μάζας ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου προκύπτει άμεσα από τη σχέση:

$$E' = \frac{\Lambda}{\lambda} = \frac{A}{\lambda(1+B)}$$

όπου λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης.

Η εξάτμιση ως εκφρασμένη ως ισοδύναμο ύψος νερού στη μονάδα του χρόνου (π.χ σε mm/d) δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{E'}{\rho}$$

όπου ρ η πυκνότητα του νερού.

2.3 Μεταφορά μάζας και εξάτμιση

Η διεργασία της εξάτμισης από αεροδυναμική άποψη θεωρείται μια διεργασία διάχυσης. Οι υδρατμοί που βρίσκονται σε κατάσταση κορεσμού κοντά στην επιφάνεια εξάτμισης μεταφέρονται προς τα πάνω όπου η συγκέντρωση είναι μικρότερη. Ο γενικός νόμος της διάχυσης είναι:

$$G_z = -D \frac{dc}{dz}$$

G_z : Ο ρυθμός μεταφορά κατά τη διεύθυνση z

D : Διαχυτότητα

Η εξάτμιση για κατακόρυφα άξονα ταυτίζεται με το ρυθμό εξάτμισης και δίνεται από τη σχέση:

$$E' = -Dv \frac{dp_v}{dz}$$

p_v : Η πυκνότητα των υδρατμών

Επίσης η εξίσωση μπορεί να γραφεί:

$$E' = -Dv \frac{\varepsilon \rho_a}{\rho} \frac{de}{dz}$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν είναι άμεσα ολοκληρώσιμη επειδή η διαχυτότητα μεταβάλλεται στον κατακόρυφο άξονα. Η διαχυτότητα των υδρατμών θεωρείται ανάλογη της διαχυτότητας της ορμής D_m που υπεισέρχεται στη παρακάτω σχέση:

$$\tau = D_m \rho_a \frac{du}{dz}$$

συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει μια σχέση που μπορεί να ολοκληρωθεί ανάμεσα σε δύο στάθμες

$$\frac{de}{dz} = - \frac{D_m}{D_v} \frac{E'}{\tau} \frac{\rho}{\varepsilon} \frac{du}{dz}$$

Ολοκληρώνοντας ανάμεσα στις στάθμες z_1 και z_2 προκύπτει:

$$e_1 - e_2 = \frac{D_m}{D_v} \frac{E'}{z} \frac{\rho}{\varepsilon} (u_2 - u_1)$$

όπου e_1 και e_2 η τάση υδρατμών στις αντίστοιχες στάθμες.

Λαμβάνοντας το λογαριθμικό νόμο διανομής των ταχυτήτων στο πεδίο ροής του ανέμου, η αρεοδυναμική έκφραση της εξάτμισης γνωστή και ως εξίσωση Thornthwaite- Holtzman είναι:

$$E' = \frac{D_v \rho_a \varepsilon \kappa^2}{D_m \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \right]^2} (u_2 - u_1) (e_1 - e_2)$$

Για την εφαρμογή της θα πρέπει να είναι γνωστή η ταχύτητα ανέμου και η τάση υδρατμών σε δύο στάθμες. Στην πράξη χρησιμοποιείται ευρύτερα η εμπειρικά προσδιορισμένη και πιο γενικευμένη εξίσωση μεταφοράς της μορφής:

$$E' = F(u) [e_*(T_s) - e]$$

όπου $F(u) = a + \beta u$ με συντελεστές a και β εμπειρικά προσδιορισμένους

Η έκφραση του λόγου Bowen δίνεται από τη παρακάτω σχέση και προϋποθέτει την μέτρηση της θερμοκρασίας τόσο στην επιφάνεια που εξατμίζει όσο και στην ατμόσφαιρα, καθώς και τη μέτρηση της υγρασίας στην ατμόσφαιρα.

$$B = \gamma \frac{T_s - T_a}{e_*(T_s) - e}$$

Ο συνδυασμός της εξίσωσης μεταφοράς και της εξίσωσης του ενεργειακού ισοζυγίου απαιτεί τελικά την μέτρηση των μετεωρολογικών μεταβλητών μόνο σε ένα επίπεδο

2.4 Βασικές μεταβλητές για την εκτίμηση της εξάτμισης

Στην ανάλυση της φυσικής διεργασίας της εξάτμισης ενδιαφέρουν τόσο οι ιδιότητες του ατμοσφαιρικού αέρα όσο και του νερού των υδρατμών. Ορισμένες από αυτές τις ιδιότητες

καθώς και άλλες που σχετίζονται με την ενεργειακή τροφοδοσία της εξάτμισης από την ηλιακή ακτινοβολία δίνονται σε αυτό το κεφάλαιο.

Πίεση κορεσμού υδρατμών e_* , hPa

Για την δεδομένη μέση θερμοκρασία του αέρα υπολογίζεται ως:

$$e_* = 6.11 e^{\frac{17.27T_a}{T_a+237.3}}$$

Κλίση καμπύλης πίεσης κορεσμού υδρατμών Δ , hPa/K

Για την δεδομένη μέση θερμοκρασία του αέρα και την ήδη υπολογισμένη πίεση κορεσμού υδρατμών e_* υπολογίζεται ως:

$$\Delta = \frac{4098 e_*}{(T + 237.2)^2}$$

Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης λ , kJ/kg

Ο υπολογισμός του λ απαιτεί την θερμοκρασία T_s στην επιφάνεια του νερού σε °C. Κάνουμε την παραδοχή πως ισούται με την θερμοκρασία του αέρα ($T_s=T_a$). Η σχέση που δίνει το λ είναι:

$$\lambda = 2501 - 2.361 T_s$$

Ψυχομετρικός συντελεστής γ , hPa/K

Υπολογίζεται από την σχέση:

$$\gamma = \frac{c_p p}{\varepsilon \lambda}$$

όπου το λ υπολογίζεται ως άνω, c_p είναι ειδική θερμότητα αέρα για σταθερή πίεση και λαμβάνεται η τυπική τιμή $c_p=1.013$ kJ/kg/°C, ε ο λόγος μοριακών βαρών νερού και ξηρού αέρα και λαμβάνεται η τιμή $\varepsilon=0.622$ και p η ατμοσφαιρική πίεση όπου χρησιμοποιείται μία μέση τιμή συναρτηθεί του υψόμετρου από την σχέση:

$$p = 1013.25 (1 - 2.256 \times 10^{-5} z)^{5.256}$$

όπου, z το υψόμετρο σε m.

Αριθμός ημέρας J

Για την περίπτωση υπολογισμού σε ημερήσιο χρονικό βήμα λαμβάνεται απλά ο αριθμός της ημέρας στο έτος από 1 για την πρώτη Ιανουαρίου έως 365 για την 31^η Δεκεμβρίου. Για τους υπολογισμούς σε μηνιαίο χρονικό βήμα λαμβάνεται μία αντιπροσωπευτική τιμή για κάθε μήνα, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$J = J_0 + (\mu + 1) - 1$$

όπου μ ο αριθμός των ημερών του μήνα, J_0 ο αριθμός ημέρας της πρώτης ημέρας του μήνα και % το σύμβολο της ακεραίας διαίρεσης.

Ηλιακή απόκλιση δ , rad

Δίνει το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο πέφτουν κάθετα οι ακτίνες του ηλίου κατά τη μεσουράνησή του:

$$\delta = 0.4093 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J - 2.98\right)$$

Γωνία ώρας δύσης του ηλίου ω_s , rad

Χρησιμοποιώντας το υπολογισμένο δ και το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής ϕ , η γωνία ώρας δύσης του ηλίου δίνεται από την σχέση:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$$

Η χρήση αυτού του μεγέθους περιορίζει τους υπολογισμούς σε γεωγραφικά πλάτη $|\phi| < 66.5^\circ$.

Αστρονομική διάρκεια της ημέρας N , h

Έχοντας υπολογίσει το ω_s , η αστρονομική διάρκεια της ημέρας σε ώρες δίνεται από την σχέση:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία S_0 , kJ/m²/d

Έχοντας υπολογίσει τα ω_s , δ , η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία δίνεται από την σχέση:

$$S_0 = \frac{I_s t_d d_r}{\pi} (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \sin \omega_s \cos \phi \cos \delta)$$

όπου t_d η μέση διάρκεια ημέρας η οποία λαμβάνεται $t_d=86400$ s, I_s ηλιακή σταθερά η οποία λαμβάνεται $I_s=1.367$ kW/m² και d_r η εκκεντρότητα η οποία δίνεται από την σχέση:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right)$$

Συντελεστής απορρόφησης της ατμόσφαιρας (Prescott) f_s

Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$f_s = a_s + b_s n/N$$

Για τα a_s , b_s λαμβάνονται οι τυπικές τιμές $a_s=0.25$, $b_s=0.50$. Για την διάρκεια ηλιοφάνειας, χρησιμοποιείται η υπολογισμένη τιμή της προηγούμενης παραγράφου.

Καθαρή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων S_n , kJ/m²/d

Υπολογίζεται από την σχέση:

$$S_n = (1-a) f_s S_0$$

Εφόσον η διάρκεια ηλιοφάνειας υπολογίζεται μέσω της μετρημένης S_n , τότε η παραπάνω τιμή θα διαφέρει από την μετρημένη τιμή $S_{n,m}$ κατά το γινόμενο με $(1-a)$ καθώς η Σχέση προκύπτει λύνοντας ως προς n την σχέση Prescott και αντικαθιστώντας το f_s με την τιμή που προκύπτει αν λύσουμε ως προς αυτήν την μεταβλητή την σχέση του S_n και θεωρώντας μηδενική τιμή albedo (εφόσον κάποια μετρητική διάταξη ακτινοβολίας έχει πρακτικά μηδενική ανακλαστικότητα).

Ο συντελεστής a λέγεται Λευκαύγεια (albedo) είναι ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Για την εφαρμογή της μεθόδου του Penman όπου υπολογίζεται το ύψος της εξάτμισης θα λαμβάνεται τυπική τιμή $a=0.08$. για την εφαρμογή της μεθόδου

των Penman-Monteith, θα λαμβάνεται τυπική τιμή $a=0.25$ που είναι μία τυπική τιμή για καλλιέργειες.

Συντελεστής επίδρασης της νέφωσης f_L

Δίνεται από την εξής σχέση:

$$f_L = a_L + b_L n/N$$

όπου για τα a_L, b_L θα λαμβάνονται οι τυπικές τιμές $a_L=0.10$ και $b_L=0.90$.

Καθαρή ικανότητα εκπομπής ε_n

Δίνεται από τον τύπο του Brunt:

$$\varepsilon_n = a_e - b_e \sqrt{e}$$

όπου e η τάση των ατμών σε hPa και δίνεται από την σχέση:

$$e = U e^*$$

όπου U το ποσοστό της σχετικής υγρασίας.

Οι αδιάστατοι παράμετροι a_e και b_e λαμβάνονται $a_e=0.56$ και $b_e=0.08$ για την μέθοδο του Penman και $a_e=0.34$ και $b_e=0.044$ για την μέθοδο Penman – Monteith.

Καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων $L_n, \text{kJ/m}^2/\text{d}$

Δίνεται από την σχέση:

$$L_n = \varepsilon_n f_L \sigma (T_a + 273)^4$$

όπου σ η σταθερά Stefan-Boltzmann $\sigma=4.9 \times 10^{-6} \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K}^4\text{d})$ και T_a η μέση θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}\text{C}$.

Ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης $R_n, \text{kJ/m}^2/\text{d}$

Είναι η διαφορά της καθαρής ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων και της καθαρής ακτινοβολίας μακρών κυμάτων:

$$R_n = S_n - L_n$$

2.5 Τεχνολογίες μέτρησης της εξάτμισης

Η εξατμοδιαπνοή είναι ιδιαίτερα σημαντική συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου, όμως η μέτρηση της εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα σε αντίθεση με άλλες υδρολογικές μεταβλητές όπως η σημειακή βροχόπτωση. Η μέτρηση της εξάτμισης πραγματοποιείται έμμεσα υπολογίζοντας την απώλεια του νερού από μία υδατική επιφάνεια. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας των εξατμισίμετρων τα οποία είναι μικρές λεκάνες γεμάτες με νερό.

Η μέτρηση της διαφοράς στάθμης σε μία ορισμένη χρονική περίοδο καθιστά εφικτή την εκτίμηση της εξάτμισης με βάση την απλή σχέση

$$E_m = P - \Delta H$$

όπου E_m η εξάτμιση, P η βροχόπτωση και ΔH λαμβάνεται θετική όταν η στάθμη του εξατμισίμετρου αυξάνεται. Σε αυτή την περίπτωση όμως είναι σαφές ότι δεν μετράμε την

φυσική εξάτμιση αλλά την εξάτμιση από ένα συγκεκριμένο όργανο και η διεργασία εξαρτάται από την θερμοχωρητικότητα του οργάνου. Για αυτό το λόγο εισάγεται η σχέση

$$E = K E_m$$

όπου $K < 1$ λέγεται συντελεστής εξατμισίμετρου και εξαρτάται από την γεωμετρία του οργάνου και τις μετεωρολογικές συνθήκες γύρω από τη θέση του οργάνου. Οι τιμές του συντελεστή δεν είναι σταθερές στην διάρκεια του έτους αλλά μεταβάλλονται σημαντικά ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Για την μέτρηση της εξατμοδιαπνοής το αντίστοιχο όργανο είναι το λυσίμετρο. Πρόκειται για λεκάνη διαμέτρου 0,5-2,0 m, γεμάτη χώμα, στην οποία έχουν φυτευτεί φυτά. Με μέτρηση του βάρους του περιεχομένου είναι δυνατή η εκτίμηση της διαφοράς της περιεκτικότητας σε νερό και συνεπώς της εξατμοδιαπνοής.

Μια σύγχρονη μετρητική προσέγγιση της εξατμοδιαπνοής είναι χρήση της τηλεπισκόπησης που βασίζεται στην έμμεση εκτίμηση της μέσω της μέτρησης μεγεθών που σχετίζονται με την υδρολογική διεργασία και μπορούν να μετρηθούν με την χρήση ραντάρ (Τσουνη, 2003).

3 Υπολογισμός εξάτμισης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής

Η εκτίμηση της εξάτμισης με την εξίσωση της μεταφοράς προϋποθέτει την μέτρηση της θερμοκρασίας σε δύο επίπεδα (επιφάνεια και ατμόσφαιρα) και της ταχύτητας ανέμου. Η εκτίμηση της εξάτμισης από την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου προϋποθέτει την γνώση του λόγου Bowen και είναι απαραίτητη η γνώση της θερμοκρασίας σε δύο επίπεδα καθώς και της σχετικής υγρασίας.

Ο Penman ήταν ο πρώτος που συνδύασε τους δύο τρόπους εκτίμησης της εξάτμισης και κατέληξε στην ομώνυμη εξίσωση η οποία εφαρμόζεται για την εκτίμηση της εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια.

3.1 Η μέθοδος Penman

Η εξάτμιση κατά το μοντέλο του Penman μπορεί να υπολογιστεί από τον συνδυασμό της εκτίμησης της εξάτμισης λόγω μεταφοράς και της εκτίμησης της εξάτμισης από το ενεργειακό ισοζύγιο (βλ παρ. 2.2 2.3). Τελικά το ύψος εξάτμισης ανά ημέρα (mm/d) δίνεται από την μία και μοναδική σχέση:

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} F(u) D$$

Αν το χρονικό βήμα υπολογισμού είναι ο μήνας, τότε η παραπάνω σχέση πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον αριθμό των ημερών του μήνα για να δώσει την συνολική μηνιαία εξάτμιση. Τα μεγέθη της εξίσωσης του Penman υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις του προηγούμενου κεφαλαίου. Εισάγεται επιπλέον η συνάρτηση ανέμου $F(u)$ καθώς και το έλλειμμα κορεσμού D που δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$F(u) = 0.13 + 0.140 u$$

όπου u η ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

$$D = e^* (1 - U)$$

όπου U η το ποσοστό της σχετικής υγρασίας και e^* η πίεση κορεσμού των υδρατμών

3.2 Η μέθοδος Penman- Monteith

Ο Monteith εισήγαγε την έννοια της επιφανειακής αντίστασης των στομάτων r_s , η οποία εκφράζει την ελεγχόμενη από την χλωρίδα αντίσταση των φυλλωμάτων στην εξάτμιση. Η παραδοχή που διατύπωσε το 1948 ο Penman ότι οι υδρατμοί κοντά στην επιφάνεια του υγρού είναι κορεσμένοι δεν ευσταθεί στην περίπτωση της διαπνοής όπου οι υδρατμοί δεν είναι κορεσμένοι στην επιφάνεια των φύλλων. Η επιφανειακή αντίσταση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την ακτινοβολία, το έλλειμμα κορεσμού, τη θερμοκρασία των φυλλωμάτων, το περιεχόμενο νερό στα φυλλώματα, το ύψος των φυτών.

Το μοντέλο των Penman – Monteith είναι μία τροποποίηση της πρωτότυπης σχέσης του Penman ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση του ύψους της δυνητικής εξατμοδιαπνοής. Η δυνητική εξατμοδιαπνοή (ύψος ανά ημέρα – mm/d) δίνεται από την σχέση:

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma'} F(u) D \quad (3.2.1)$$

Η συνάρτηση ανέμου $F(u)$ δίνεται από την σχέση:

$$F(u) = \frac{90}{273 + T_a} u \quad (3.2.2)$$

όπου u η ταχύτητα του ανέμου σε m/s και T_a η μέση θερμοκρασία σε °C. Ο ανηγμένος ψυχομετρικός συντελεστής γ' δίνεται από την σχέση:

$$\gamma' = \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right) \quad (3.2.3)$$

$$\gamma' = \gamma (1 + 0.33 u) \quad (3.2.4)$$

όπου γ η τιμή του ψυχομετρικού συντελεστή για τους υδρατμούς και u η ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

Η εξίσωση Penman-Monteith μεταπίπτει άμεσα στην εξίσωση Penman. Στην περίπτωση της υδάτινης επιφάνειας ισχύει $r_s=0$ οπότε $\gamma'=\gamma$.

3.3 Η μέθοδος Doorenbos-Pruit

Η Doorenbos- Pruit πρότειναν το 1997 μια ελαφρά τροποποίηση της σχέσης του Penman, χωρίς να εισάγουν την έννοια της επιφανειακής αντίστασης. Η μέθοδος συνοψίζεται από τη σχέση:

$$E = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Rn}{\lambda} + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} F(u) D \right]$$

Η πρώτη τροποποίηση είναι η εισαγωγή του συντελεστή αναγωγής c που εξαρτάται από από την μέγιστη σχετική υγρασία, την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος, την ταχύτητα ανέμου κατά την διάρκεια της νύχτας.

Η δεύτερη τροποποίηση αφορά στη συνάρτηση ανέμου, η οποία είναι $F(u)=0,27(1+0.86u)$. Η μέθοδος αποτελεί από το 1970 μέχρι πρόσφατα το διεθνές πρότυπο, γνωστό και ως πρότυπο FAO, εκτίμησης των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών.

3.4 Απλοποιήσεις των μεθόδων συνδυασμού

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα των μεθόδων συνδυασμού οδήγησε πολλούς ερευνητές στη διατύπωση εξισώσεων με λιγότερα απαιτούμενα πρωτογενή δεδομένα. Μια εύχρηστη και αρκετά διαδεδομένη σχέση διατυπώθηκε το 1972 από τους Priestley και Taylor και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$E = a_e \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Rn}{\lambda} \quad (3.4.1)$$

Η σχέση χρησιμοποιεί των ενεργειακό όρο της εξίσωσης και Penman, τον οποίο επαυξάνει κατά 30% παραλείποντας τον όρο της μεταφοράς και για την εφαρμογή δεν απαιτείται η γνώση της ταχύτητας ανέμου.

Μια άλλη απλοποίηση της μεθόδου συνδυασμού θεωρείται η σχέση του Linacre που διατυπώθηκε το 1977. Για την εξάτμιση από υδάτινη επιφάνεια, η εξίσωση γράφεται:

$$E = \frac{700(T + 0.006z)/(100 - \phi) + 15(T - T_d)}{80 - T} \quad (mm/d) \quad (3.4.2)$$

z: Το υψόμετρο σε m.

ϕ : Το γεωγραφικό πλάτος σε μοίρες

T_d : Το σημείο δρόσου που κατά το Linacre μπορεί να εκτιμηθεί από θερμοκρασιακά δεδομένα.

Από τη μελέτη του προκύπτει ότι και η ακτινοβολία εμπεριέχεται έμμεσα σε σχέση με τη θερμοκρασία.

Άλλοι ερευνητές αναζήτησαν απλοποιήσεις των μεθόδων συνδυασμού και κατέληξαν σε μία κατηγορία μαθηματικών εκφράσεων που έχουν για δεδομένα εισόδου την εξωγήινη ακτινοβολία και την μέση θερμοκρασία. Πρώτοι οι Jensen και Haise (1963) χρησιμοποιώντας την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου καθώς και μετρήσεις εξατμοδιαπνοής από αρδευόμενες εκτάσεις των Η.Π.Α διατύπωσαν την σχέση 3.4.3 που αποτελεί την απλοποίηση των μεθόδων συνδυασμού. Η εξίσωση έχει μοναδικό άγνωστο την μέση ημερήσια θερμοκρασία και την εξωγήινη ακτινοβολία που είναι μέγεθος που υπολογίζεται σχετικά εύκολα

$$PE = \frac{Re T_a}{\lambda \rho 40} \quad (3.4.3)$$

Το 1972 οι McGuinness και Bordne πρότειναν μια τροποποίηση της 3.4.3 και τελικά η σχέση που δίνει την ημερήσια δυνητική εξατμοδιαπνοή δίνεται στην ως:

$$PE = \frac{Re T_a + 5}{\lambda \rho 68} \quad (3.4.4)$$

Μια πρόσφατη έρευνα (Oudin *et al.*, 2005) αναθεωρεί και τις δύο εξισώσεις διατυπώνοντας την 3.4.5. Στην συγκεκριμένη δημοσίευση οι ερευνητές συλλέγουν πρωτογενή δεδομένα ημερησίας βροχόπτωσης, ημερησίων υδρομετρήσεων από λεκάνες των ΗΠΑ, της Γαλλίας

και της Αυστραλίας και εξάγουν την δυνητική εξατμοδιαπνοή την οποία συγκρίνουν με μετρημένες τιμές στις ίδιες λεκάνες, ορίζοντας διάφορα μέτρα επίδοσης. Από την ανάλυση τους προτείνουν την τροποποίηση της σχέσης McGuinness και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η εξίσωση ίσως να περιγράφει πιο αποτελεσματικά το φαινόμενο ακόμη και από την καθιερωμένη μέθοδο των Penman- Monteith. Βέβαια στην βαθμονόμηση των τεσσάρων υδρολογικών μοντέλων που χρησιμοποίησαν ενυπάρχουν πολλές αβεβαιότητες, όπως για παράδειγμα η υιοθέτηση της τιμής του συντελεστή της άμεσης απορροής.

$$PE = \frac{Re}{\lambda \rho} \frac{T_a + 5}{100} \quad (3.4.5)$$

Στις σχέσεις 3.4.3, 3.4.4 και 3.4.5

PE : Το ύψος της ημερήσιας δυνητικής εξατμοδιαπνοής (mm)

Re : Η εξωγήινη ακτινοβολία ($MJm^{-2}day^{-1}$)

T_a : Η μέση ημερήσια θερμοκρασία ($^{\circ}C$)

λ : λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (kJ/kg)

ρ : Η πυκνότητα του νερού (kgL^{-1})

4 Εμπειρικά μοντέλα

Η πολυπλοκότητα των μεθόδων συνδυασμού για τον υπολογισμό της εξάτμισης και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής καθώς και η απαίτηση τους σε πολλά δεδομένα εισόδου οδήγησε τους ερευνητές στη αναζήτηση απλούστερων εξισώσεων για τον υπολογισμό της εξάτμισης και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής. Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται σε εμπειρικές εκφράσεις, απαιτούν θερμοκρασιακά δεδομένα εισόδου και έχουν τύχη ευρείας εφαρμογής κυρίως για την εκτίμηση των υδατικών αναγκών.

4.1 Η μέθοδος Thornthwaite

Είναι η πλέον απλή ως προς την υπολογιστική διαδικασία μέθοδος η οποία όμως έχει τύχει ευρύτατης εφαρμογής αν και τείνει να ξεπεραστεί (1948). Η δυνητική εξατμοδιαπνοή κάποιου μήνα υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_p = 16 \left(\frac{10 T_a}{I} \right)^a \frac{\mu N}{360}$$

όπου E_p η δυνητική εξατμοδιαπνοή σε mm/μήνα, T_a η μέση θερμοκρασία του μήνα σε °C, μ ο αριθμός των ημερών του μήνα, N η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας (λαμβάνεται η τιμή στην μέση του μήνα), I εμπειρικός συντελεστής που ονομάζεται ετήσιος θερμικός δείκτης και a άλλος εμπειρικός συντελεστής, συνάρτηση του I . Οι εμπειρικοί συντελεστές υπολογίζονται από το δείγμα των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών του έτους (T_{aj} , $j=1..12$) ως εξής:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i_j$$

$$i_j = 0.09 T_{a_j}^{3/2}$$

$$a = 0.016I + 0.5$$

4.2 Η μέθοδος Hargreaves

Η μέθοδος του Hargreaves χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η εξατμοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς. Η μέθοδος απαιτεί την ύπαρξη χρονοσειράς θερμοκρασίας με μηνιαίο ή και ημερήσιο χρονικό βήμα, η δε τιμή της εξατμοδιαπνοής αναφοράς E_{rc} σε mm/d υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_{rc} = \frac{0.0023 S_0}{\lambda} (T_a + 17.8)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$$

όπου S_0 η εξωγήινη ακτινοβολία σε kJ/(m²d) η οποία υπολογίζεται στην συγκεκριμένη ημέρα προκειμένου για ημερήσιο υπολογισμό της εξατμοδιαπνοής ή στην μέση του μήνα για μηνιαίο, λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε kJ/kg και θα λαμβάνεται η τιμή $\lambda=2460$, T_a η μέση θερμοκρασία και T_{\max} , T_{\min} , η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία της χρονοσειράς μέσης θερμοκρασίας.

4.3 Η μέθοδος Blaney- Criddle

Η μέθοδος Blaney-Criddle έχει τύχει ευρύτατης εφαρμογής για την εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών. Η μηνιαία δυνητική εξατμοδιαπνοή μίας καλλιέργειας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση η οποία έχει ως μόνη μετεωρολογική μεταβλητή την μέση μηνιαία θερμοκρασία T_a :

$$E_p = 0.254 k_c p (32 + 1.8 T_a)$$

όπου E_p η δυνητική εξατμοδιαπνοή σε mm/μήνα, k_c ο συντελεστής καταναλωτικής χρήσης (φυτικός συντελεστής) και p το ποσοστό (%) των ωρών ημέρας του συγκεκριμένου μήνα σε σχέση με το σύνολο των ωρών ημέρας του έτους. Το ποσοστό αυτό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p = 100 \frac{\mu N}{365 \times 12}$$

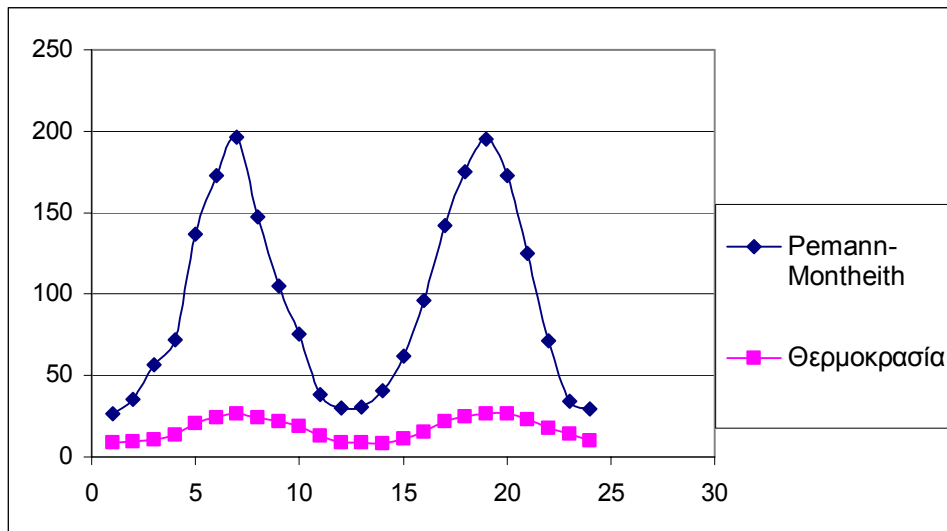
όπου N η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας στο μέσο του μήνα σε ώρες και μ ο αριθμός ημερών του συγκεκριμένου μήνα

5 Ανάπτυξη μοντέλου

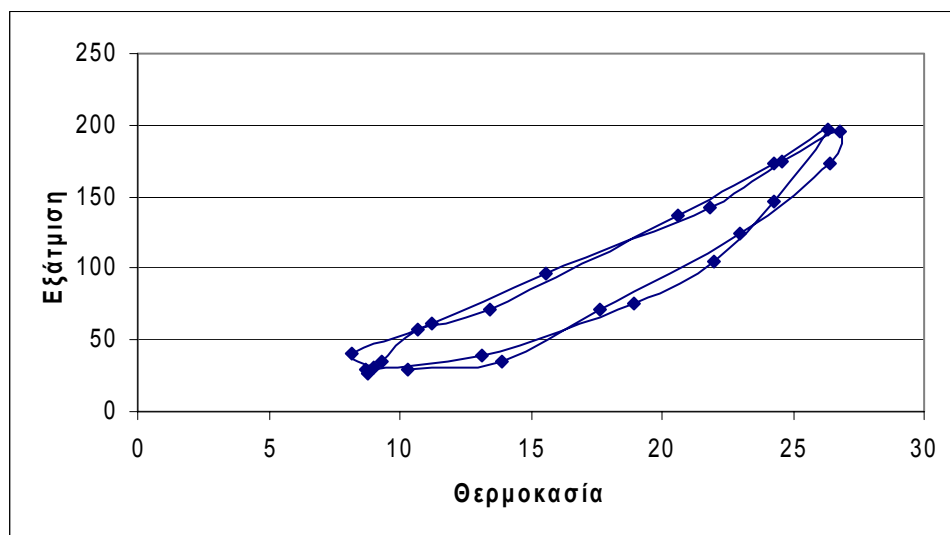
Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου για τον υπολογισμό της εξάτμισης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής. Το νέο μοντέλο βασίζεται στη μέθοδο Penman- Montheith. Η βασική ιδέα είναι η προσαρμογή του μοντέλου σε ένα δείγμα αναφοράς δυνητικής εξάτμοδιαπνοής Penman- Montheith, όπου στο δείγμα είναι γνωστές σε μηνιαία κλίμακα οι τιμές των αναγκαίων εισερχόμενων δεδομένων (μέσης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου, ηλιοφάνειας) και στη συνέχεια η εξαγωγή μιας νέας σχέσης με λιγότερες αναγκαίες εισερχόμενες μεταβλητές (π.χ μόνο της θερμοκρασίας).

5.1 Η σχέση εξάτμισης-θερμοκρασίας-ακτινοβολίας

Μια απλή μέθοδος συμπλήρωσης και επέκτασης δείγματος εξάτμισης είναι η κατασκευή ενός διαγράμματος εξάτμισης ή δυνητικής εξατμοδιαπνοής που υπολογίστηκε για μία περίοδο που είναι διαθέσιμα τα απαιτούμενα πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα και η επέκταση του δείγματος για μία άλλη περίοδο, όπου είναι γνωστή μόνο η μέση μηνιαία θερμοκρασία. Στο διάγραμμα 5.1 διακρίνεται η μεταβολή της δυνητικής εξατμοδιαπνοής και της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου για το μετεωρολογικό σταθμό του Αγρινίου την περίοδο 1/1984-12/1985. Παρατηρούμε ότι η εξάτμιση και η θερμοκρασία παρουσιάζουν την ίδια μεταβολή στο χρόνο. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της δυνητικής εξατμοδιαπνοής (για τον ίδιο σταθμό και για την ίδια περίοδο) συναρτήσει της θερμοκρασίας. Μπορούμε να διακρίνουμε τον σχηματισμό ενός βρόχου, οπότε προκύπτει το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει αμφιμονοσήμαντη σχέση μεταξύ εξάτμισης και θερμοκρασίας. Έτσι αν σε έναν φθινοπωρινό μήνα (π.χ. Σεπτέμβριο) έχουμε την ίδια μέση θερμοκρασία με έναν θερινό μήνα (π.χ. Απρίλιο), η δυνητική εξατμοδιαπνοή είναι μικρότερη το Σεπτέμβριο απ'ότι τον Απρίλιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία το φθινόπωρο είναι μικρότερη απ'ότι την άνοιξη παρά την ίδια τιμή θερμοκρασίας.

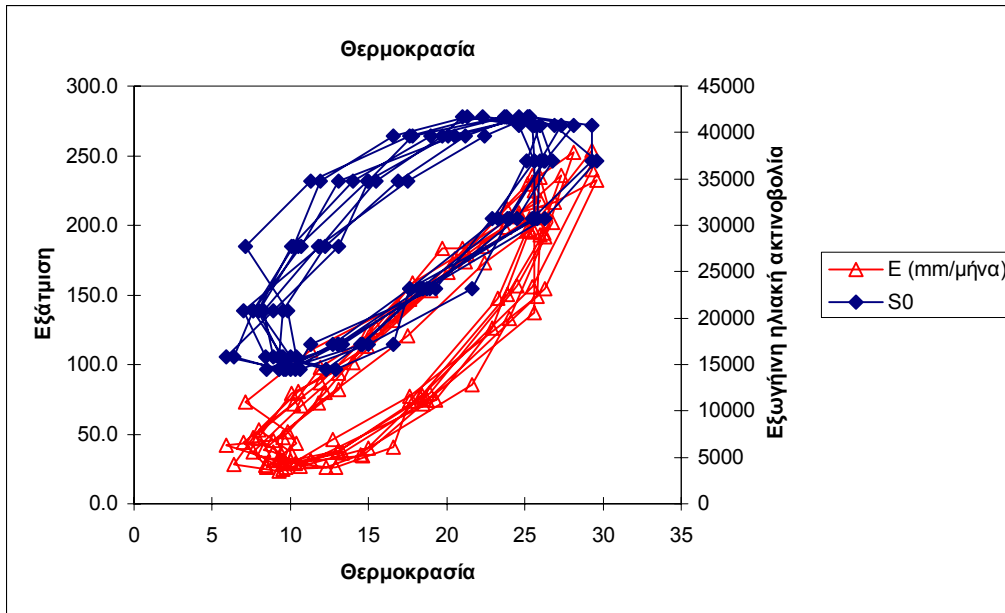


Σχήμα 5.1: Μεταβολή Εξάτμισης και θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο (Σταθμός Αγρινίου)



Σχήμα 5.2: Μεταβολή Εξάτμισης-Θερμοκρασίας (Σταθμός Αγρινίου)

Η συσχέτιση ενός δείγματος δυνητικής εξατμοδιαπνοής δεν μπορεί να γίνει μόνο με την γνώση την μέσης θερμοκρασίας αλλά απαιτείται και η εξωγήινη ακτινοβολία ως ανεξάρτητης παραμέτρου. Πράγματι όπως διακρίνουμε και στο σχήμα 5.3 η μεταβολή της εξωγήινης ακτινοβολίας σε σχέση με τη θερμοκρασία παρουσιάζει την εικόνα ενός βρόχου αντίστοιχου με την μεταβολή της εξάτμισης με την θερμοκρασία για την ίδια χρονική περίοδο (Πηγή: Κουτσογιάννης 1999).



Σχήμα 5.3 Σχέση εξάτμισης-θερμοκρασίας και εξωγήνης ακτινοβολίας-θερμοκρασίας (Πηγή Κουτσογιάννης 1999)

5.2 Η διατύπωση του μοντέλου

Το μοντέλο Penman για τον υπολογισμό της εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια δίνεται από τη σχέση

$$E = \frac{Rn + \gamma F(u)D}{1 + \frac{\gamma}{\Delta}} \quad (5.2.1)$$

Rn : Ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολία βραχέων κυμάτων $KJ / m^2 / d$

$Rn = S_n - L_n$

S_n : Καθαρή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων $S_n = (1 - a) f_s S_0$

L_n : Καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων $L_n = \epsilon_n f_L \sigma (T_a + 273)^4$

γ : Ψυχομετρικός συντελεστής, τυπική τιμή $0.67 \text{ hPa} / k$

Δ : Κλίση καμπύλης πίεσης κορεσμού υδρατμών $\Delta = \frac{4098 e_*}{(T + 237.3)^2}$

e_* : Πίεση κορεσμού υδρατμών hPa $e_* = 6.11 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)$

D : Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών $D = e_*(T_a)(1 - u)$

u : Σχετική υγρασία

$F(u)$: Συνάρτηση ανέμου $F(u) = \frac{43.6u}{T + 273}$

a : albedo

Στην απλοποίηση των Priestley- Taylor ο όρος μεταφοράς παραλείπεται και προσαξάνεται ο ενεργειακός όρος κατά 30%. Δεχόμενοι αυτή την προσέγγιση και εισάγοντας μια νέα δραστική απλοποίηση μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο πρώτος όρος μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική συνάρτηση της εξωγήινης ακτινοβολίας $R_n = a'S_0 - b'$ και συνδυάζοντας με την προσέγγιση των Priestley- Taylor προκύπτει $R_n = aS_0 - b$.

Ο παρονομαστής αντικαθίσταται στο νέο μοντέλο από τη σχέση $1 - cT$ αφού είναι φθίνουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Η τελική σχέση του μοντέλου που διατυπώθηκε από τον Κουτσογιάννη (1999) δίνεται στη σχέση 5.2.2. Οι άγνωστοι παράμετροι a , b , c υπολογίζονται από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων

$$E = \frac{aS_0 - b}{1 - cT} \quad (5.2.2)$$

Συγκεκριμένα για τους μετεωρολογικούς σταθμούς που συγκεντρώθηκαν τα απαραίτητα πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα υπολογίστηκε η δυνητική εξατμοδιαπνοή με την μέθοδο Penman- Monteith για την περίοδο 1/1968-12/1983

Τα κριτήρια καλής προσαρμογής που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο *συντελεστής αποτελεσματικότητας* (coefficient of efficiency), ο οποίος είναι ένα τυπικό στατιστικό μέτρο καλής προσαρμογής και ορίζεται ως:

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

όπου x_i είναι η παρατηρημένη χρονοσειρά (Penman-Monteith) εξατμοδιαπνοής, \bar{x} η μέση τιμή της, y_i η προσομοιωμένη χρονοσειρά (Παραμετρική εξίσωση) εξατμοδιαπνοής και n ο χρονικός ορίζοντας ελέγχου. Ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1. Αν $R = 1$ υπάρχει απόλυτη ταύτιση της παρατηρημένης με την προσομοιωμένη χρονοσειρά. Προφανώς, κάτι τέτοιο δεν είναι ποτέ εφικτό για ένα μαθηματικό μοντέλο που αναπαριστά φυσικές διεργασίες και, ως εκ τούτου, υπόκειται τόσο σε δομικά σφάλματα όσο και σε σφάλματα μετρήσεων. Εφόσον $R < 0$ η προσαρμογή του μοντέλου θεωρείται πολύ κακή, καθώς η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι χειρότερη εκτιμήτρια σε σχέση με την μέση παρατηρημένη τιμή \bar{x} .

5.3 Μεθοδολογία προσαρμογής

Εφαρμόζεται η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων, συγκεκριμένα η μέθοδος μεταβολής των μεταβλητών (Μπαλοδήμου, 1991) που βασίζεται σε διαδοχικές προσεγγίσεις. Έστω a, b και c οι άγνωστες τιμές των παραμέτρων. Έστω a_0, b_0 και c_0 μία αρχική χονδροειδής εκτίμηση των παραμέτρων.

Αρχικά, υπολογίζεται ένα διάνυσμα μεταβολής για τον i^{th} υπολογιστικό κύκλο:

$$\delta[x_i] = [\delta a_i, \delta b_i, \delta c_i]$$

Οπότε η τιμή των παραμέτρων στον i^{th} υπολογιστικό κύκλο διαμορφώνεται ως:

$$[x_i] = [x_{i-1}] + \delta[x_i]$$

Θεωρούμε πως έχουμε συγκλίνει στην τελική λύση όταν η ευκλείδεια νόρμα του $\delta[x_i]$ πέσει κάτω από ένα κατώφλι ε :

$$|\delta[x_i]| \leq \varepsilon$$

οπότε και σταματάει η διαδικασία των υπολογισμών. Το κατώφλι το θέτουμε $\varepsilon=0.0001$,

Το $\delta[x_i]$ υπολογίζεται ως λύση του παρακάτω γραμμικού συστήματος εξισώσεων:

$$[N] \delta[x] = [A]^T [\delta I]^T$$

Όπου το $[N]$ είναι μητρώο 3x3. Το μητρώο $[A]$ καθώς και το διάνυσμα $[\delta I]$ εξεταστούν στην συνέχεια. Το μητρώο $[N]$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$[N] = [A]^T [A]$$

Έστω δείγμα υπολογισμένης εξάτμισης (ή εξατμοδιαπνοής) με την μέθοδο Penman (ή Penman – Monteith) E_j , $j=1 \dots n$ τις οποίες καταχρηστικά τις καλούμε αλλά για λόγους διάκρισης ως «μετρημένες τιμές». Έστω T_{aj} , $j=1 \dots n$ οι αντίστοιχες μετρήσεις της μέσης θερμοκρασίας του αέρα. Τότε το μητρώο $[A]$ θα έχει διαστάσεις n γραμμές x 3 στήλες και ορίζεται ως:

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{\partial E(T_{a1})}{\partial a} & \frac{\partial E(T_{a1})}{\partial b} & \frac{\partial E(T_{a1})}{\partial c} \\ \frac{\partial E(T_{an})}{\partial a} & \frac{\partial E(T_{an})}{\partial b} & \frac{\partial E(T_{an})}{\partial c} \end{bmatrix}$$

Όπου $E(T_{aj})$ η αναλυτική έκφραση της παραμετρικής εξίσωσης της εξάτμισης 5.2.2. Οι μερικές παράγωγοι ως προς τις παραμέτρους υπολογίζονται αναλυτικά ως:

$$\frac{\partial E(T_{aj})}{\partial a} = \frac{S_0}{1 - c_{i-1} T_{aj}}, \quad \frac{\partial E(T_{aj})}{\partial b} = \frac{-1}{1 - c_{i-1} T_{aj}}, \quad \frac{\partial E(T_{aj})}{\partial c} = \frac{(a_{i-1} S_0 - b_{i-1}) T_{aj}}{(1 - c_{i-1} T_{aj})^2}$$

όπου a_{i-1} , b_{i-1} και c_{i-1} οι επιτευχθείσες τιμές των παραμέτρων από τον προηγούμενο υπολογιστικό κύκλο. Το διάνυσμα $[\delta I]$ διάστασης n , είναι η διαφορά της υπολογισμένης τιμής (χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του προηγούμενου υπολογιστικού κύκλου) και της μετρημένης τιμής της εξάτμισης και είναι ίσο με:

$$[\delta I] = \left[E(T_{a1}) - \frac{E_1}{\mu}, \quad \Lambda, \quad E(T_{an}) - \frac{E_n}{\mu} \right]$$

όπου μ είναι ο αριθμός των ημερών του μήνα που αντιστοιχεί στην j μέτρηση εφόσον οι υπολογισμοί γίνονται σε μηνιαίο χρονικό βήμα. Αν οι υπολογισμοί γίνονται σε ημερήσιο βήμα τότε τίθεται $\mu=1$. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ύστερα από λίγες προσεγγίσεις (συνήθως απαιτούνται 3-4 για να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια) υπολογίζονται οι τελικές τιμές των a, b και c . Ο συντελεστής αποτελεσματικότητας προκύπτει εύκολα σε κάθε βήμα από το διάνυσμα $[\delta I]$. Με αυτήν την παραδοχή ο συντελεστής αναφέρεται στο $i-1^{\text{th}}$ βήμα, ωστόσο δεν διαφοροποιείται ιδιαίτερα μετά τον τρίτο κύκλο, έτσι υιοθετούμε την τιμή που προκύπτει για το προτελευταίο βήμα. Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων είναι:

$$w = | [\delta l] [\delta l]^T |$$

όπου $||$ η ευκλείδεια νόρμα. Τελικά ο συντελεστής προσδιορισμού προκύπτει από την σχέση:

$$\delta_{i-1} = 1 - \frac{w}{(n-1)\sigma_{Ta}^2}$$

όπου σ_{Ta}^2 η διασπορά του δείγματος θερμοκρασιών για την κοινή περίοδο με τα μετρημένα E_j .

6 Δεδομένα και επεξεργασίες

Η νέα σχέση εφαρμόστηκε σε μηνιαία κλίμακα σε 37 σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (σχήμα 6.1) που καλύπτουν αντιπροσωπευτικά σημεία της χώρας μας. Χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου η μέση μηνιαία θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα ανέμου. Ο υπολογισμός της δυνητικής εξατμοδιαπνοής καθώς και της παραμετρικής εξίσωσης έγινε με τη χρήση του «ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ» ενός εργαλείου πληροφορικής που παρέχει πλήθος εφαρμογών και στατιστικών μεθόδων.

6.1 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες

Στο πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι μετεωρολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία. Χρησιμοποιήθηκαν τα πρωτογενή δεδομένα των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών, που απαιτούνται για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμοδιαπνοής κατά Penman- Monteith, δίχως συμπληρώσεις των ιστορικών χρονοσειρών. Η ανυπαρξία μηνιαίων τιμών ταχύτητας ανέμου σε ηλεκτρονική μορφή σε όλους τους σταθμούς μας οδήγησε στη χρήση κλιματικών τιμών δηλαδή των μέσων όρων τριακονταετίας. Συγκεκριμένα ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα.

Για την περίοδο της βαθμονόμησης η οποία είναι η περίοδος 1/1968-12/1983:

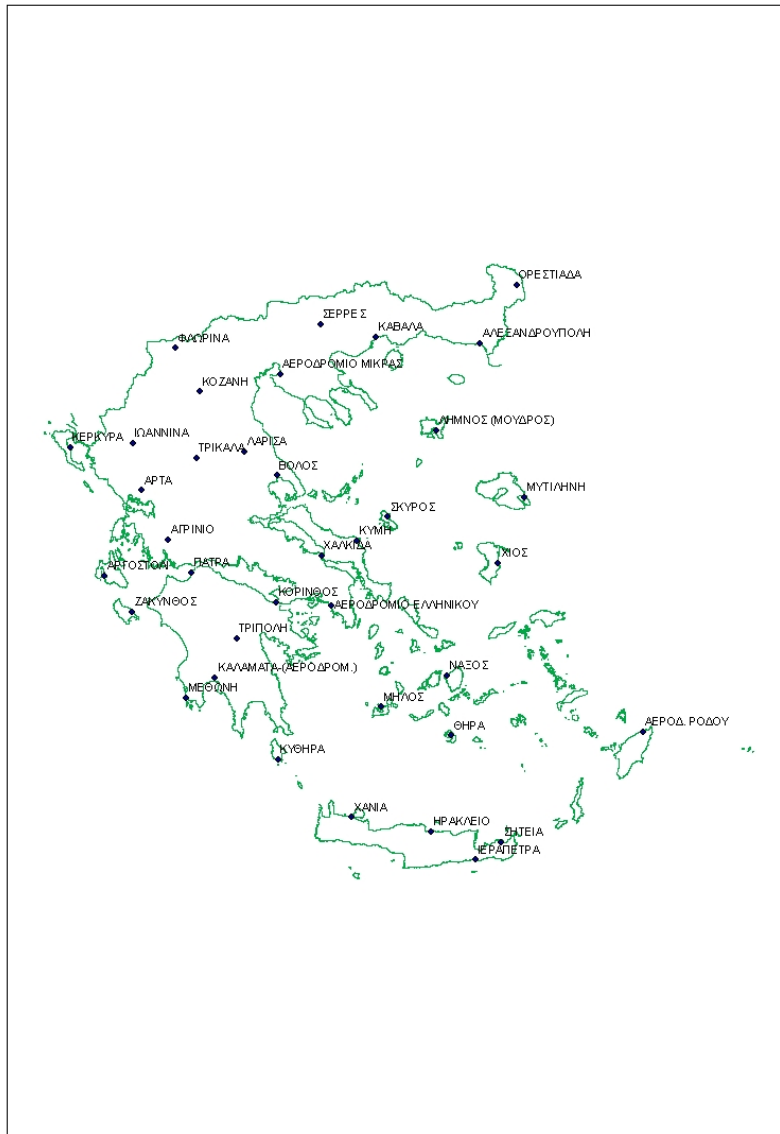
- Υπολογίστηκε η μηνιαία δυνητική εξατμοδιαπνοή κατά Penman- Monteith, εισάγοντας τις χρονοσειρές της θερμοκρασίας, της ηλιοφάνειας, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας ανέμου καθώς και το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο του σταθμού (Πίνακας 6.1) στο πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ.
- Προσαρμόστηκε αυτόματα η παραμετρική εξίσωση και έγινε η εξαγωγή των παραμέτρων a,b,c.
- Τα αποτελέσματα μεταφέρθηκαν σε λογιστικό φύλλο και υπολογίστηκε ο συντελεστής αποτελεσματικότητας.

Για την περίοδο της επαλήθευσης η οποία είναι η περίοδος 1/1984-12/1989:

- Υπολογίστηκε η μηνιαία δυνητική εξατμοδιαπνοή κατά Penman- Monteith όπως και στην περίοδο της βαθμονόμησης.
- Υπολογίστηκε η μηνιαία δυνητική εξατμοδιαπνοή με τη χρήση της παραμετρικής εξίσωσης με τις παραμέτρους που προέκυψαν απ' την βαθμονόμηση και χρησιμοποιώντας για δεδομένα εισόδου την εξωγήινη ακτινοβολία (υπολογίστηκε μέσω αναλυτικών σχέσεων) κάθε σταθμού και την μέση μηνιαία θερμοκρασία.
- Υπολογίστηκε εκ νέου ο συντελεστής αποτελεσματικότητας για την περίοδο της επαλήθευσης.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε για την περίοδο της βαθμονόμησης και διακρίνεται σε δύο στάδια. Στο 1^ο στάδιο στοχική συνάρτηση προς μεγιστοποίηση ορίστηκε ο συντελεστής αποτελεσματικότητας με περιορισμό τον μηδενισμό της παραμέτρου b. Στο 2^ο στάδιο ορίστηκε επίσης στοχική συνάρτηση η μεγιστοποίηση του συντελεστή

αποτελεσματικότητας με περιορισμό ότι η παράμετρος c ισούται με τον μέσο όρο των τιμών c από το στάδιο 1.



Σχήμα 6.1 Θέσεις μετεωρολογικών σταθμών

	Σταθμός	Γεωγραφικό πλάτος (°)	Υψόμετρο (m)
1	Λήμνος	39.54	17
2	Χανιά	35.3	63
3	Χαλκίδα	38.28	6
4	Φλώρινα	40.47	662
5	Τρίπολη	37.32	663
6	Τρίκαλα	39.33	116
7	Σκύρος	38.54	5
8	Σητεία	35.12	28
9	Σέρρες	41.4	35
10	Ρόδος	36.24	37
11	Πάτρα	38.15	3
12	Ορεστιάδα	41.5	48
13	Νάξος	37.6	9
14	Μυτιλήνη	39.3	5
15	Μηλός	36.41	183
16	Μέθωνη	36.5	34
17	Λάρισα	39.39	74
18	Κύμη	38.38	221
19	Κύθηρα	36.1	167
20	Κόρινθος	38.2	15
21	Κοζάνη	40.18	626
22	Ελληνικό	37.54	15
23	Αγρίνιο	38.37	46
24	Αλεξανδρούπολη	40.51	4
25	Αργοστόλι	38.11	2
26	Άρτα	39.1	38
27	Βόλος	39.23	7
28	Ζάκυνθος	37.47	8
29	Ηράκλειο	35.2	39
30	Θήρα	36.25	208
31	Ιεράπετρα	35	14
32	Ιωάννινα	39.42	484
33	Καβάλα	40.54	63
34	Καλαμάτα	37.4	8
35	Κέρκυρα	39.37	2
36	Θεσσαλονίκη	40.31	5
37	Χίος	38.2	4

Πίνακας 6.1: Υψόμετρα και γεωγραφικά πλάτη σταθμών.

6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμέτρων για κάθε μετεωρολογικό σταθμό για την αρχική έκφραση της παραμετρικής εξίσωσης, καθώς και τα αποτελέσματα μετά από την 1^η και 2^η βελτιστοποίηση. Μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι πετυχαίνουμε σε όλους τους σταθμούς πολύ καλή προσαρμογή και στις δύο περιόδους πλην των αποτελεσμάτων του σταθμού των Τρικάλων και της Τρίπολης (2^η βελτιστοποίηση), όπου ο συντελεστής αποτελεσματικότητας μειώνεται σημαντικά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριών σταθμών ενώ τα υπόλοιπα επισυνάπτονται στο παράρτημα.

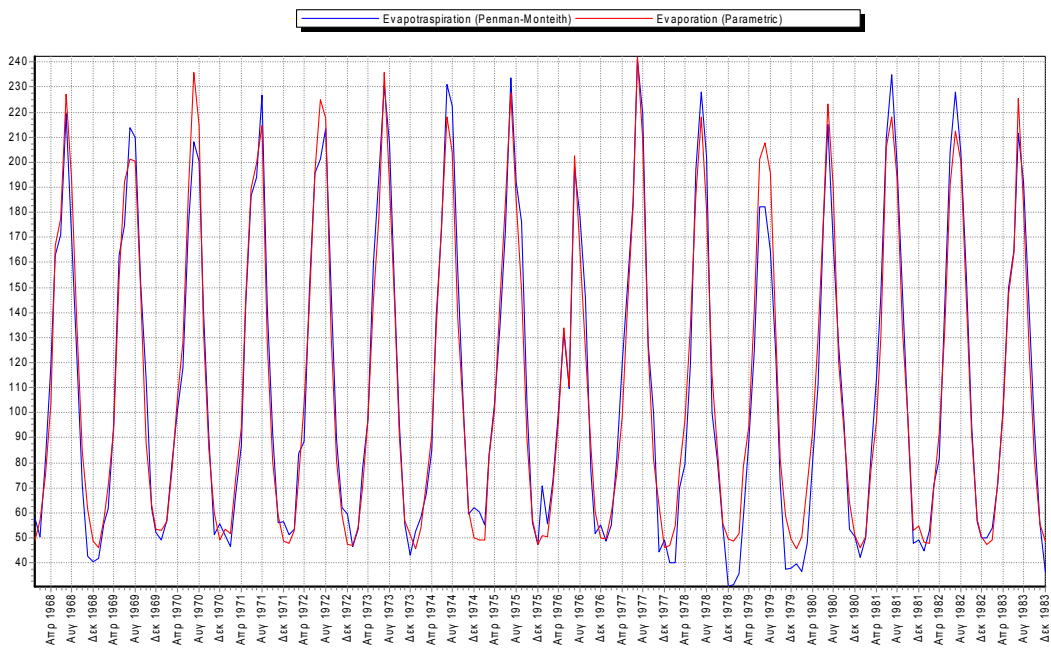
Στο σταθμό της Λήμνου την περίοδο της βαθμονόμησης ο συντελεστής αποτελεσματικότητας είναι 96,1% και της επαλήθευσης 97,10%, ενώ μετά την πρώτη και δεύτερη βελτιστοποίηση μειώνεται πολύ λίγο για την περίοδο της βαθμονόμησης και γίνεται 94,4% και 94,78%.

Στο σταθμό των Χανίων την περίοδο της βαθμονόμησης ο συντελεστής αποτελεσματικότητας είναι 97,3% και της επαλήθευσης 96,30%, ενώ μετά την πρώτη και δεύτερη βελτιστοποίηση μειώνεται ελάχιστα για την περίοδο της βαθμονόμησης και γίνεται 97% και 96%.

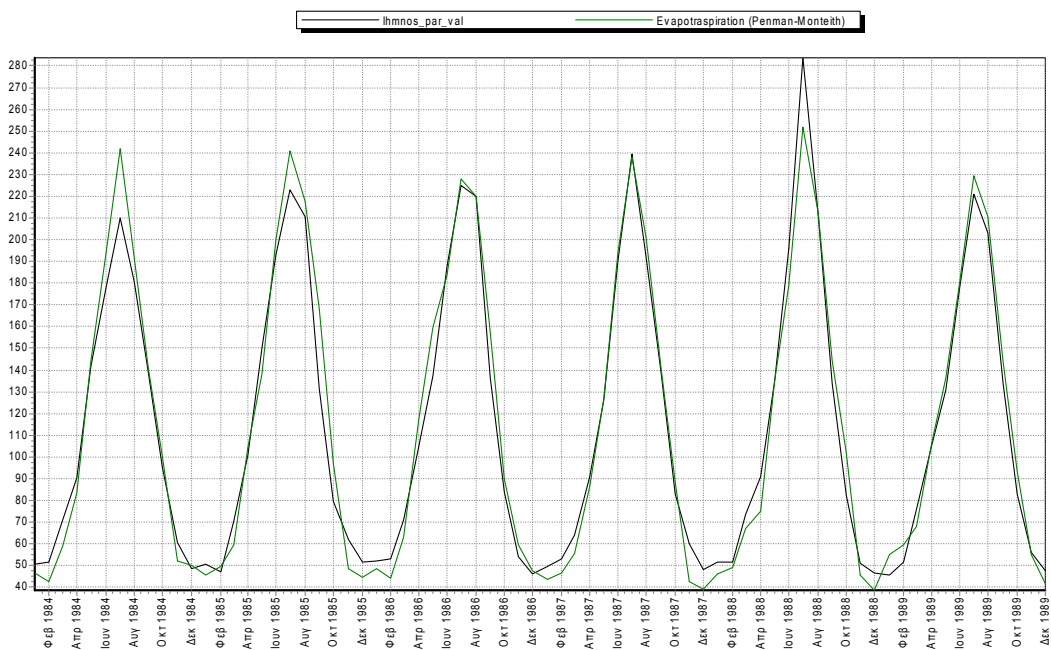
Στο σταθμό της Χαλκίδας την περίοδο της βαθμονόμησης ο συντελεστής αποτελεσματικότητας είναι 95% και της επαλήθευσης 95,30%, ενώ μετά την πρώτη βελτιστοποίηση μειώνεται ελάχιστα για την περίοδο της βαθμονόμησης (95%) και σημαντικότερα για τη δεύτερη βελτιστοποίηση (86,9%).

Στα αποτελέσματα και των τριών σταθμών για την περίοδο της επαλήθευσης εμφανίζεται υποεκτίμηση της παραμετρικής εξίσωσης (Σχ. 6.2.2, 6.2.4, 6.2.6) σε σύγκριση με τη Penman-Monteith κατά τους καλοκαιρινούς και χειμερινούς μήνες. Σημαντικότερες αποκλίσεις εμφανίζονται στο σταθμό της Χαλκίδας (Σχ. 6.2.6).

Λήμνος	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000402	-0.624	0.0027	96.4%	97,10%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000652	0	0.02472	94.94%	
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000695	0	0,02344	94.78%	

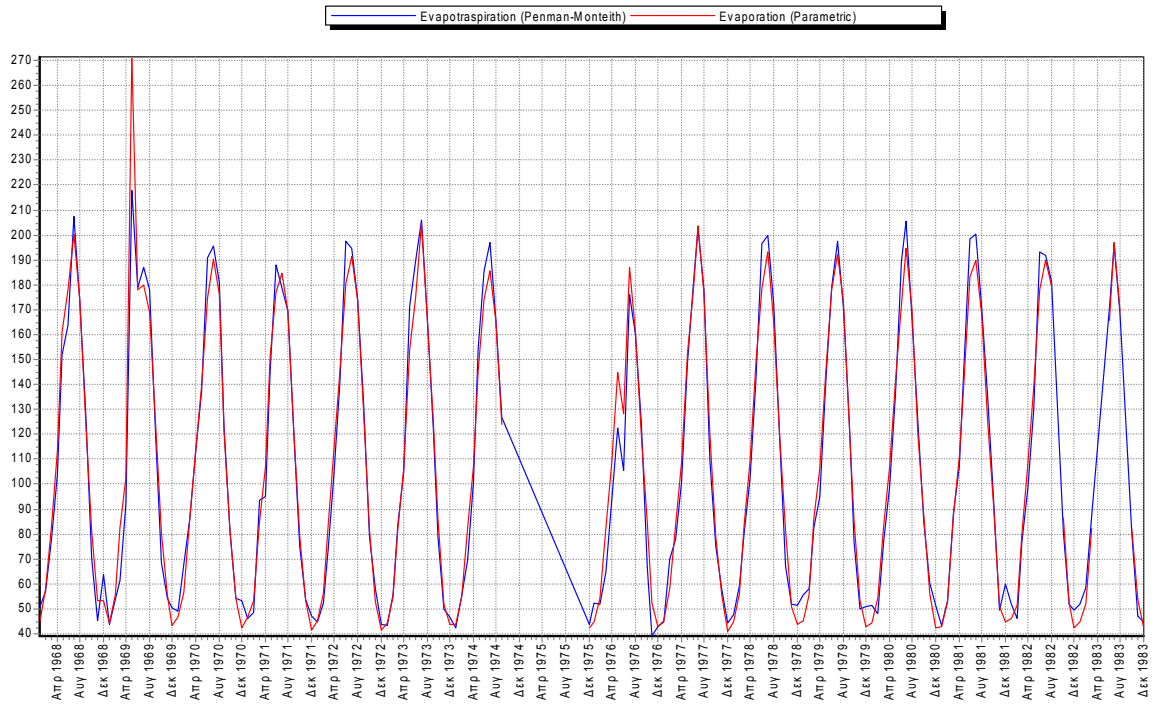


Σχήμα 6.2.1: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Λήμνου

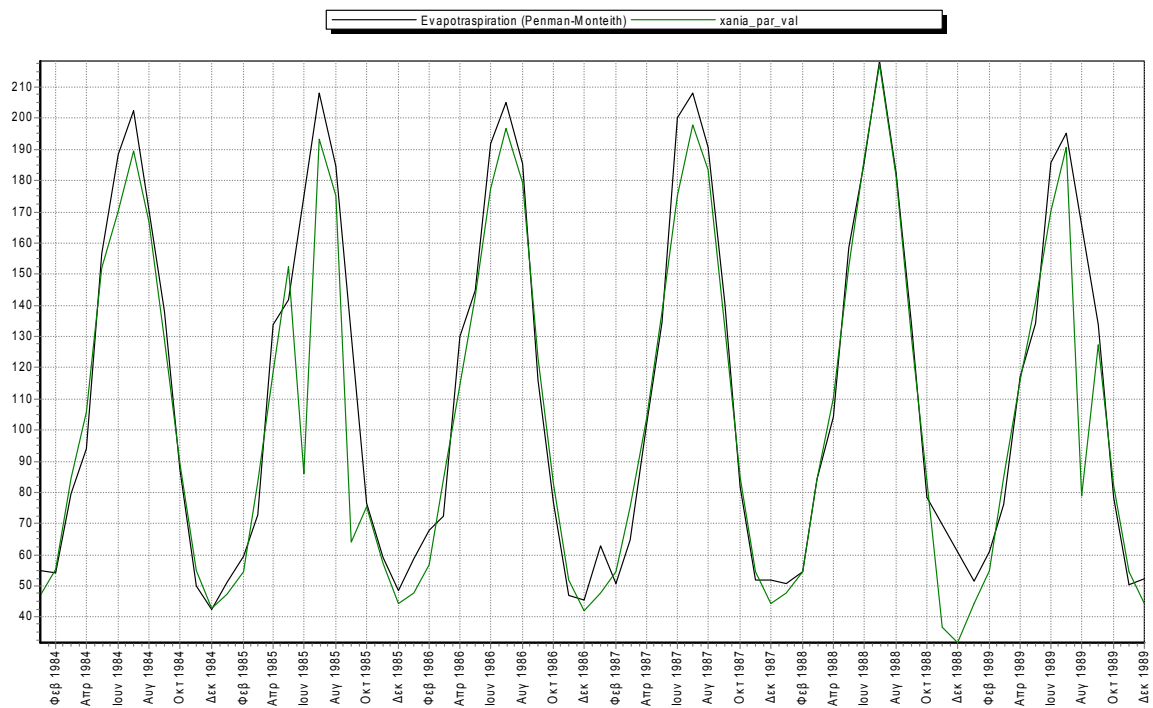


Σχήμα 6.2.2: Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Λήμνου

Χαλιά	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000739	0.0207	0.0208	97.3%	96.3%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000654	0	0.02154	97%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000593	0	0,02344	96%	-

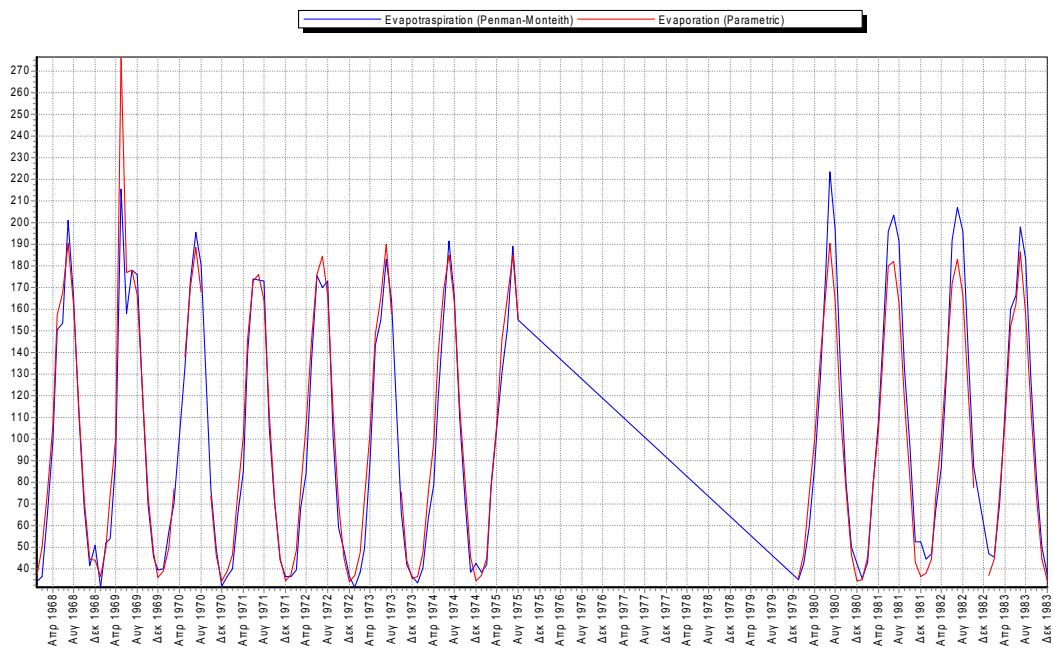


Σχήμα 6.2.3: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό των Χανίων

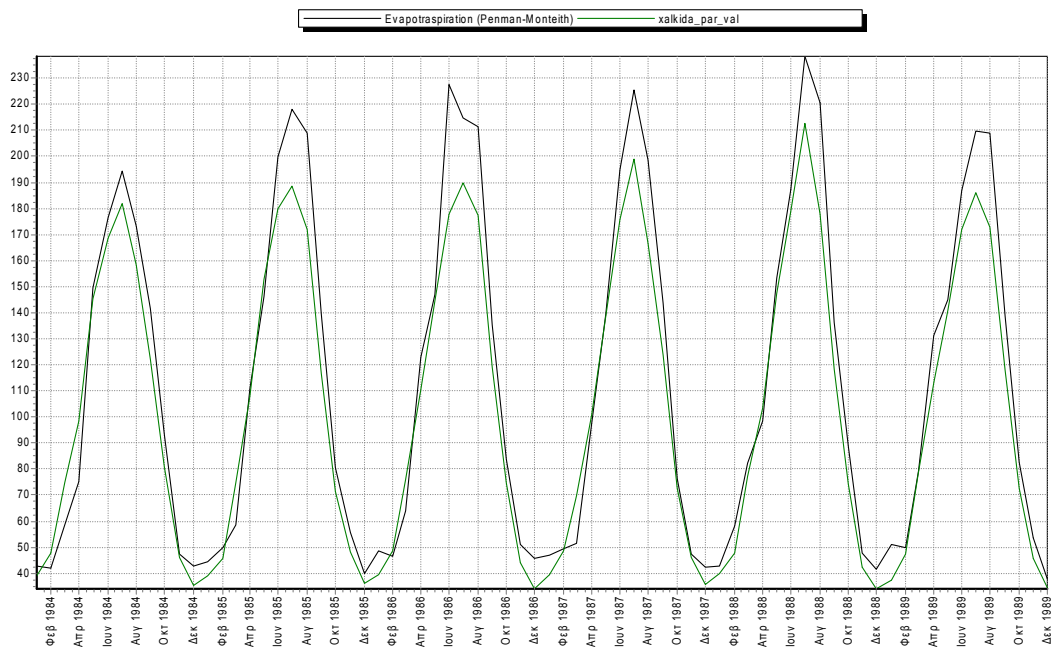


Σχήμα 6.2.4: Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό των Χανίων

Χαλκίδα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0,0000755	0,219	0,0191	95%	95.3%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000672	0	0.0197	95%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000534	0	0.02344	86.9%	-



Σχήμα 6.2.5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Χαλκίδας



Σχήμα 6.2.6: Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Χαλκίδας

7 Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά η σύγκριση των αποτελεσμάτων της νέας παραμετρικής εξίσωσης με απλοποιήσεις των μεθόδων συνδυασμού που προτείνονται από την διεθνή βιβλιογραφία καθώς και με εμπειρικές εξισώσεις.

7.1 Σύγκριση με άλλες σχέσεις εξωγήινης ακτινοβολίας

Η βασική σύγκριση αφορά μια ομάδα εξισώσεων που αναπτύχθηκαν από ερευνητές και έχουν ως εισερχόμενα δεδομένα την εξωγήινη ακτινοβολία και την μέση μηνιαία θερμοκρασία. Έχουν προταθεί στην διεθνή βιβλιογραφία τρεις διαφορετικές εκφράσεις για την εκτίμηση της εξάτμισης και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής. (βλ κεφ. 3.4). Ως μέτρο επίδοσης για την σύγκριση θεωρήθηκε ο συντελεστής προσδιορισμού με δείγμα αναφοράς χρονοσειρά την μηνιαία δυνητική εξατμοδιαπνοή κατά Penman- Monteith.

Στο πίνακα 7.1 συνοψίζονται τα αποτελέσματα και για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου και παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές προσδιορισμού για τις σχέσεις Oudin και Mcguinness.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι με την νέα παραμετρική εξίσωση πετυχαίνουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τις άλλες εξισώσεις στα αποτελέσματα όλων των σταθμών.

Σταθμός	Rpar(cal)	Rpar(val)	ROudin(cal)	ROudin(val)	RMc(cal)	RMc(val)
Λήμνος	96.40%	97.10%	53%	62.70%	73.80%	94.30%
Χανιά	97.30%	96.30%	81.90%	82.40%	59.70%	76.60%
Χαλκίδα	95%	95.30%	91%	81.90%	59.90%	84.10%
Φλώρινα	96.70%	96.00%	95.30%	94.10%	64.30%	71.70%
Τρίπολη	94.20%	95.00%	84.80%	80.60%	85.70%	91.50%
Τρίκαλα	97.30%	97.00%	94.30%	92.30%	66.80%	76.40%
Σκύρος	92.60%	91.00%	72.50%	70.20%	76.30%	77.60%
Σητεία	98.50%	99.00%	61.10%	66.80%	92.30%	89.40%
Σέρρες	98.20%	97.00%	97.20%	93.40%	50.10%	74%
Ρόδος	97.20%	97.00%	55.20%	53.80%	93.50%	95%
Πάτρα	98.70%	96.00%	90.40%	90.70%	60.80%	59.50%
Ορεστιάδα	98.10%	97.00%	93.60%	90.40%	68.30%	72.40%
Νάξος	97.50%	98%	45.50%	43.90%	80.30%	85.70%
Μυτιλήνη	98.80%	97.00%	52.50%	73.80%	94.90%	81.50%
Μηλός	97.20%	98%	53.60%	48.40%	92.60%	94.10%
Μέθωνη	96.20%	97.00%	76.70%	74.20%	59.40%	62.58%
Λάρισα	98.70%	98.00%	95.20%	94%	62.30%	71.00%
Κύμη	97.50%	91.00%	69.80%	60.90%	92.20%	95.60%
Κύθηρα	95.70%	97.00%	41.70%	50.40%	92.30%	93.50%

Κόρινθος	95.70%	82.00%	40.60%	77.30%	91.80%	92.90%
Κοζάνη	98.20%	98.00%	92.70%	91.50%	66.30%	75.20%
Ελληνικό	98.30%	98%	63.90%	61%	92%	93%
Αγρίνιο	98.90%	97.50%	95.70%	94.60%	50.70%	60.44%
Αλεξανδρούπολη	97.10%	97.00%	82.10%	76.40%	78.50%	88%
Αργοστόλι	98.20%	98.00%	83.90%	79.21%	68.20%	75%
Άρτα	98.10%	87.10%	88.10%	87.21%	62.30%	73.73%
Βόλος	98.10%	91.00%	84.64%	93.73%	75.70%	61.00%
Ζάκυνθος	97.40%	98%	71.20%	75%	83.80%	88.70%
Ηράκλειο	98%	98%	51.41%	48.46%	89.70%	92.10%
Θήρα	97.10%	94.00%	53.70%	47.39%	90.80%	88.82%
Ιεράπετρα	96.20%	94.00%	52.44%	41.80%	86.67%	91.60%
Ιωάννινα	98.70%	98%	91.70%	96.30%	36.10%	54.10%
Καβάλα	98.30%	98%	89.30%	96.20%	19.50%	43.50%
Καλαμάτα	98.30%	98.00%	86.20%	87.60%	74%	74.40%
Κέρκυρα	98.90%	99.00%	96.10%	94.30%	38.00%	51.60%
Θέσσαλονικη	98.30%	98.00%	87.40%	84.70%	79.40%	84.40%
Χίος	91.90%	95.30%	57.90%	66.50%	86.50%	90.50%

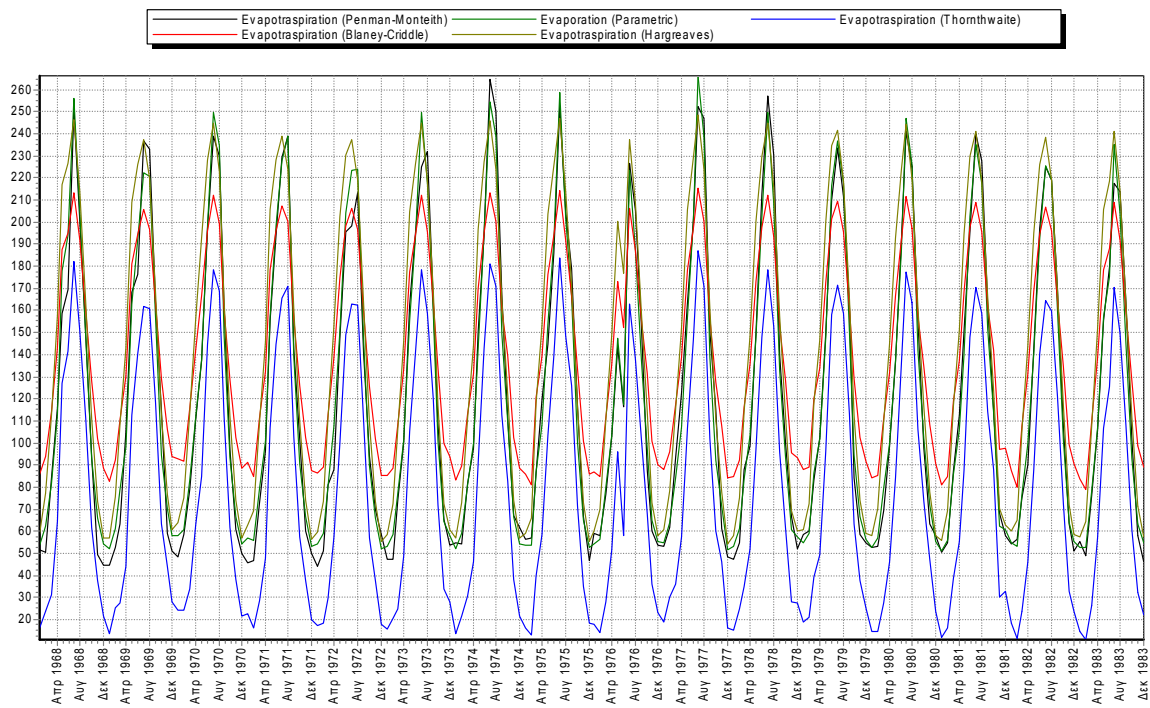
Πίνακας 7.1: Παρουσίαση συγκριτικών αποτελεσμάτων

7.2 Σύγκριση με εμπειρικές μεθόδους

Παρουσιάζονται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής εξίσωσης με τις εμπειρικές μεθόδους των Hargreaves, Blaney-Criddle, Thornthwaite για τον σταθμό του Ελληνικού για την περίοδο της βαθμονόμησης. Όπως διακρίνουμε και στον πίνακα 7.2 και στο σχήμα 7.2 η παραμετρική εξίσωση παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερους συντελεστές προσδιορισμού σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διαδεδομένες εμπειρικές εξισώσεις.

Μέθοδος	Συντελεστής προσδιορισμού
Παραμετρική	98.20%
Thornthwaite	47.90%
Blaney-Criddle	79.60%
Hargreaves	84.40%

Πίνακας 7.2: Συντελεστές Προσδιορισμού παραμετρικής και εμπειρικών μεθόδων για το Σταθμό του Ελληνικού



Σχήμα 7.2: Σχηματική απεικόνιση Penman-Monteith, παραμετρικής και εμπειρικών μεθόδων για το σταθμό του Ελληνικού.

8 Γεωγραφική παρεμβολή παραμέτρων

Η γνώση της χωρικής κατανομής είναι πολύ σημαντική για όλες τις υδρομετεωρολογικές μεταβλητές. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχική μεταβολή των παραμέτρων του νέου μοντέλου υπολογισμού της δυναμικής εξατμοδιαπνοής. Η ανάλυση με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικής Πληροφορίας επιτρέπει τη χρήση της νέας απλοποιημένης έκφρασης σε όλο τον ελλαδικό χώρο. Η χωρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για δύο διαφορετικές μαθηματικές εκφράσεις της παραμετρικής εξίσωσης.

8.1 Μέθοδοι παρεμβολής σε Σ.Γ.Π

Οι μέθοδοι παρεμβολής στα Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας διακρίνονται σε ακριβούς παρεμβολής και εξομάλυνσης, ανάλογα με το αν η κατασκευασμένη επιφάνεια διατηρεί ή όχι τις μετρημένες σημειακές τιμές. Μια δεύτερη κατηγοριοποίηση των μεθόδων τις διαχωρίζει σε στατιστικές- στοχαστικές και προσδιοριστικές. Οι πρώτες βασίζονται στην αρχή να μειώνουν το σφάλμα παρεμβολής στα σημεία της επιφάνειας όπου δεν υπάρχουν σημειακές μετρήσεις, ενώ οι δεύτερες παράγουν επιφάνειες με τη χρήση μαθηματικών σχέσεων. Πλεονέκτημα των στατιστικών μεθόδων είναι ότι υπολογίζουν το σφάλμα παρεμβολής σε οποιοδήποτε σημείο.

Η περιοχή ολοκλήρωσης διαμερίζεται σε ισομεγέθη στοιχειώδη κύτταρα ή ψηφίδες, με την εφαρμογή ενός ορθογωνικού καννάβου, με δεδομένη ισαποχή των οριζοντίων και κατακόρυφων γραμμών του. Για κάθε κύτταρο υπολογίζεται, η τιμή της μεταβλητής, η οποία αντιστοιχεί στο κέντρο του κυττάρου αλλά θεωρείται σταθερή για όλη την επιφάνεια του. Η επιφανειακή τιμή προκύπτει ως μέσο όρος των τιμών όλων των κυττάρων. Η τιμή που ολοκληρώνεται μπορεί να είναι στιγμιαία, μέση ή αθροιστική για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια.

Οι προσδιοριστικές μέθοδοι προσαρμόζουν ένα τύπο επιφάνειας σε ένα σύνολο μετρημένων τιμών της τιμής σε συγκεκριμένες γεωγραφικές συντεταγμένες. Χρησιμοποιούνται διάφορες μαθηματικές σχέσεις για την προσαρμογή των επιφανειών και ύστερα είναι δυνατός ο υπολογισμός της μεταβλητής σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου.

Εάν τα σημειακά δεδομένα θεωρούνται ως ακριβής τιμές της μεταβλητής τότε επιλέγεται ένα σχήμα ακριβούς παρεμβολής (η επιφάνεια διατηρεί τις μετρημένες τιμές της), ενώ αν τα δεδομένα περιέχουν σημαντικό σφάλμα μέτρησης επιλέγεται ένα σχήμα εξομάλυνσης.

Οι μέθοδοι εξομάλυνσης είναι η πολυωνυμική, η υψομετρική και η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων

Οι μέθοδοι παρεμβολής είναι η spline, η πολυτετραγωνική και η μέθοδος των σταθμισμένων αντιστρόφων αποστάσεων (ΣΑΑ).

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της μεθόδου των Σταθμισμένων Αντίστροφων Αποστάσεων.

Η παρεμβολή γίνεται με βάση την εφαρμογή της σχέσης:

$$h = \frac{d_1^{-k}}{\sum_{n=1}^N d_n^{-k}} h_1 + \frac{d_2^{-k}}{\sum_{n=1}^N d_n^{-k}} h_2 + \dots + \frac{d_N^{-k}}{\sum_{n=1}^N d_n^{-k}} h_N$$

όπου:

h: Η τιμή της μεταβλητή στη ζητούμενη θέση

N: Ο αριθμός των σημείων που συμμετέχουν

h_1, h_2, \dots, h_N : Οι σημειακές μετρήσεις στα σημεία 1,2,3,...,N

d_1, d_2, \dots, d_N : Οι αποστάσεις του κυττάρου από τα σημεία 1,2,3,...,N

k: Ο συντελεστής επιρροής της απόστασης.

8.2 Μεταβολή παραμέτρου a

Η παρεμβολή της παραμέτρου a αφορά την σχέση που προέκυψε από τα αποτελέσματα της δεύτερης βελτιστοποίησης της παραμετρικής εξίσωσης, δηλαδή μεγιστοποιώντας τον συντελεστή αποτελεσματικότητας με την προϋπόθεση μηδενισμού της παραμέτρου b και εισαγωγή στην παραμετρική εξίσωση του μέσου όρου των τιμών της παραμέτρου c, όπως αυτές προέκυψαν από την διαδικασία της 1^{ης} βελτιστοποίησης. Στο σχήμα 8.1.1 παρουσιάζονται οι τιμές της παραμέτρου για κάθε σταθμό.



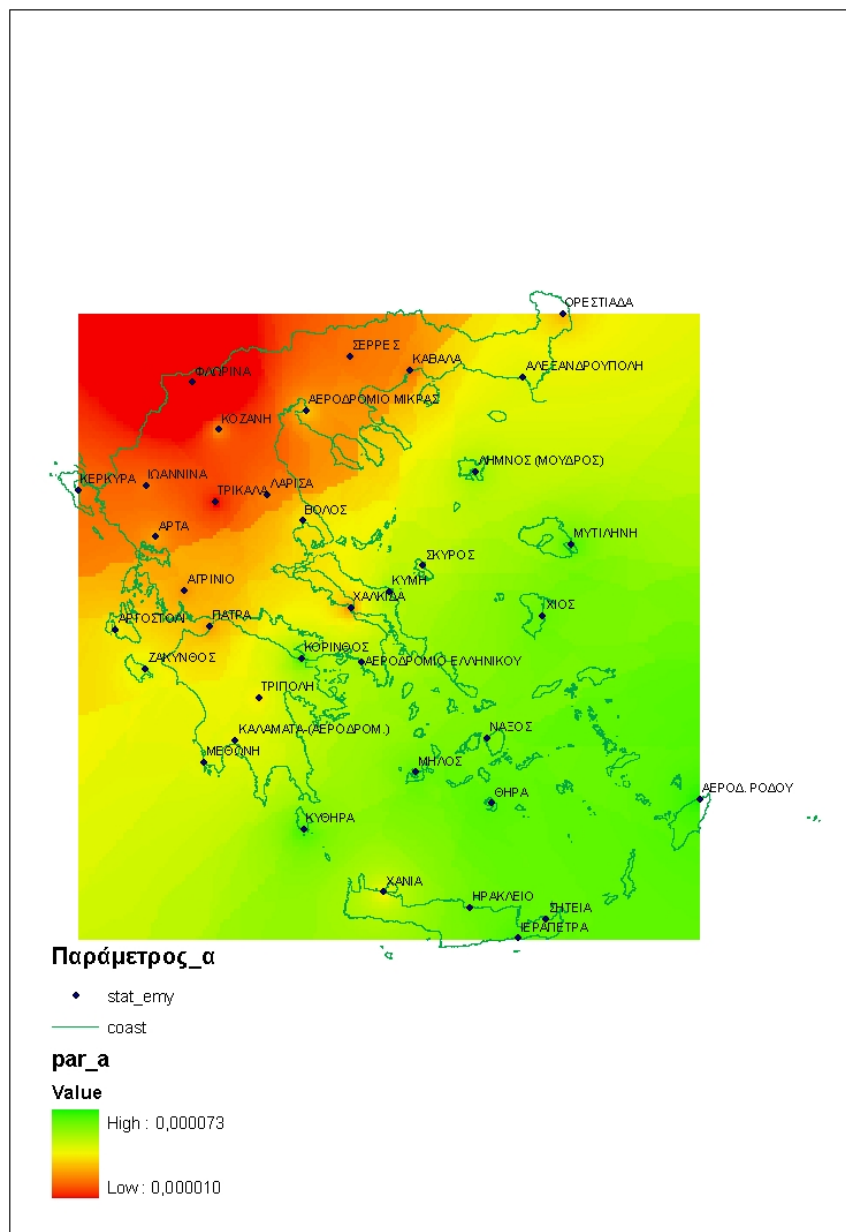
Σχήμα 8.2.1: Τιμές της παραμέτρου α για κάθε σταθμό

Η παραμετρική εξίσωση σε αυτή την περίπτωση έχει την μορφή:

$$E = \frac{aS_0}{1 - 0.02344T}$$

Στο χάρτη 8.2.2 απεικονίζεται η χωρική μεταβολή της παραμέτρου α μετά τη χρήση της μεθόδου των Σταθμισμένων Αντίστροφων Αποστάσεων.

Παρατηρούμε ότι η τιμή της παραμέτρου αυξάνεται από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά. Η φυσική σημασία της γεωγραφικής μεταβολής της παραμέτρου εκφράζει ότι οι μεγαλύτερες τιμές της εμφανίζονται στην νησιωτική Ελλάδα όπου έχουμε μεγάλες ταχύτητες ανέμου, υψηλές τιμές ηλιοφάνειας ως προς το νότο, οπότε και αυξημένες τιμές δυναμικής εξατμοδιαπνοής.



Σχήμα 8.2.2: Τιμές της παραμέτρου α για κάθε σταθμό

8.3 Μεταβολή παραμέτρων a, c

Πραγματοποιήθηκε η γεωγραφική παρεμβολή των παραμέτρων a,c για την έκφραση της παραμετρικής εξίσωσης που προέκυψε μετά την πρώτη βελτιστοποίηση. Ο λόγος είναι ότι κατά την δεύτερη βελτιστοποίηση προέκυψαν μικροί συντελεστές αποτελεσματικότητας για τους σταθμούς των Τρικάλων και της Τρίπολης. Μετά την 1^η βελτιστοποίηση και στους 37 σταθμούς εμφανίστηκε μια πολύ μικρή μείωση του συντελεστή αποτελεσματικότητας, γι'

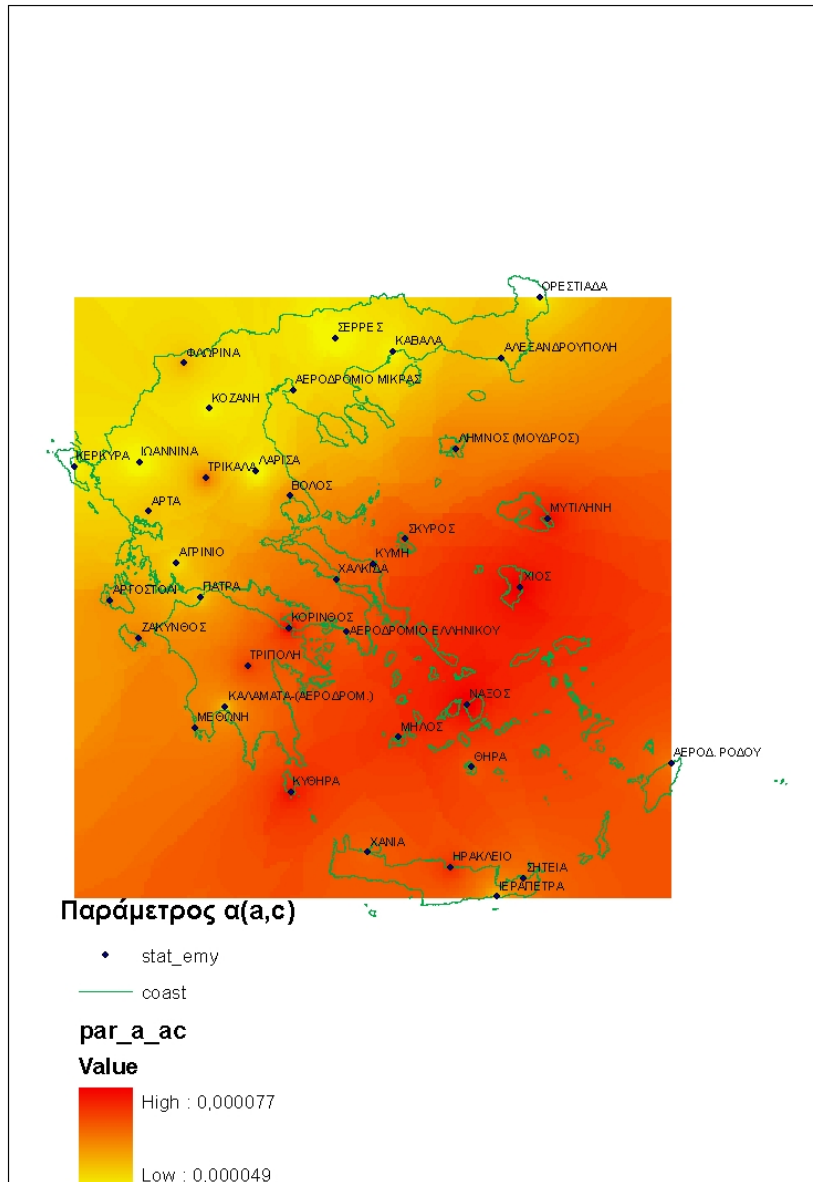
αυτό και αυτή η έκφραση κρίνεται πιο συνεπέστερη. Υπενθυμίζεται ότι η μαθηματική έκφραση δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{aS_0}{1-cT}$$

Η φυσική μεταβολή της παραμέτρου α (Σχ, 8.3.2) έχει την ίδια μορφή με την μεταβολή που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 8.2. Η παράμετρος c δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές στον Ελλαδικό χώρο για αυτό άλλωστε και στην δεύτερη βελτιστοποίηση αντικαταστάθηκε με το μέσο όρο των τιμών τους.



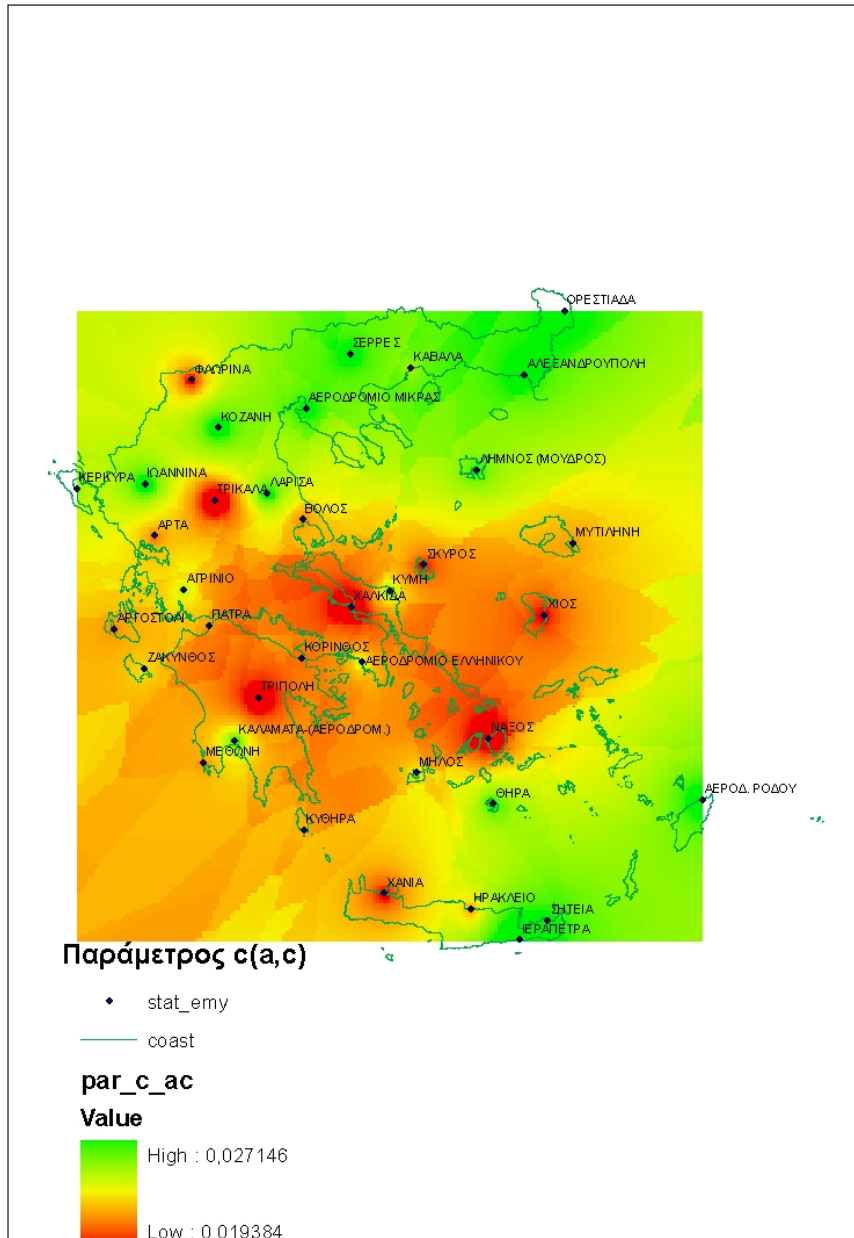
Σχήμα 8.3.1: Τιμές της παραμέτρου α για κάθε σταθμό



Σχήμα 8.3.2: Γεωγραφική παρεμβολή παραμέτρου α



Σχήμα 8.3.3: Τιμές της παραμέτρου c για κάθε σταθμό



Σχήμα 8.3.4: Γεωγραφική παρεμβολή παραμέτρου c

9 Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη του νέου παραμετρικού μοντέλου και η εξαγωγή των παραμέτρων σε όλο τον Ελλαδικό χώρο αποτέλεσε αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας και συνέβαλε στην παραγωγή μιας νέας χρήσιμης προσέγγισης γύρω από την εκτίμηση της εξατμοδιαπνοής. Συγκεκριμένα μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής βασικά συμπεράσματα:

Το νέο παραμετρικό μοντέλο για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμοδιαπνοής συμπληρώνει την υπάρχουσα γνώση γύρω από αρκετές ερευνητικές προσπάθειες απλοποιήσεων των μεθόδων συνδυασμού (Penman, Penman- Monteith).

Χρησιμοποιώντας ένα δείγμα αναφοράς δυνητικής εξατμοδιαπνοής προσαρμόστηκε μια παραμετρική μαθηματική έκφραση που εμφάνισε μεγάλους συντελεστές αποτελεσματικότητας και στην περίοδο βαθμονόμησης αλλά και της επαλήθευσης. Οι διαφορετικές μορφές παραμετρικών εξισώσεων που προτείνονται έχουν ως αναγκαίο δεδομένο τη μέση μηνιαία θερμοκρασία, που χρειάζεται να μετρηθεί, και την εξωγήινη ακτινοβολία που υπολογίζεται μέσω αναλυτικών σχέσεων (χωρίς μετρήσεις) και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του έτους.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την παραγωγή της νέας εξίσωσης βασίζεται σε απλοποίηση των μεθόδων συνδυασμού, που είναι διεθνώς αποδεκτές για την επάρκεια στην ενεργειακή και αεροδυναμική ερμηνεία του φαινομένου της εξατμοδιαπνοής.

Οι ερευνητικές απλοποιήσεις των μεθόδων συνδυασμού της βιβλιογραφίας, που παρατίθενται αναλυτικά στη συγκεκριμένη εργασία παρήγαγαν εξισώσεις που δεν ερμηνεύουν πλήρως το φυσικό φαινόμενο. Οι Jensen και Mcguinness χρησιμοποιούν το ενεργειακό ισοζύγιο και ένα αριθμό μετρήσεων για την παραγωγή μια νέας απλοποιημένης εξίσωσης εκτίμησης της δυνητικής εξατμοδιαπνοής, ενώ ο Linacre στην ανάλυση του διατύπωσε αμφιμονοσήμαντη σχέση μεταξύ εξάτμισης και θερμοκρασίας που δεν ισχύει. Η πρόσφατη εργασία των Oudin et al που προτείνουν μια ελαφριά τροποποίηση της σχέσης των Jensen και Mcguinness δεν αναιρεί την σπουδαιότητα των μεθόδων συνδυασμού και την υψηλή τους επίδοση στην ερμηνεία του φαινομένου σύμφωνα και με τους ίδιους τους ερευνητές.

Από την ανάλυση που έγινε στην συγκεκριμένη εργασία πετυχαίνουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με όλες τις απλοποιητικές εκφράσεις των μεθόδων συνδυασμού. Ακόμη έγινε η σύγκριση και με εμπειρικές μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως και στην χώρα μας και τα αποτελέσματα, όπως αναμένονταν, ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά

Η γεωγραφική παρεμβολή των παραμέτρων σε όλη την ελληνική επικράτεια παρείχε Ψηφιακά Μοντέλα σε Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας που δίνουν την τιμή των παραμέτρων σε κάθε σημείο της χώρας και συμβάλλουν στην άρση της πολυπλοκότητας εκτίμησης της εξατμοδιαπνοής. Η γεωγραφική παρεμβολή των τιμών φαίνεται να βρίσκεται σε αντιστοιχία με τη φυσική συμπεριφορά του φαινομένου της εξατμοδιαπνοής. Με την

προτεινόμενη μέθοδο για τη συνεπή εκτίμηση της εξατμοδιαπνοής στη χώρα μας απαιτείται μόνο η μέση θερμοκρασία και η εξωγήινη ακτινοβολία.

Οι νέες εξισώσεις έχουν ευρεία εφαρμογή σε ζητήματα διαχείρισης των υδάτινων πόρων όπως η εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου, ο υπολογισμός των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών και η εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες.

Βιβλιογραφία

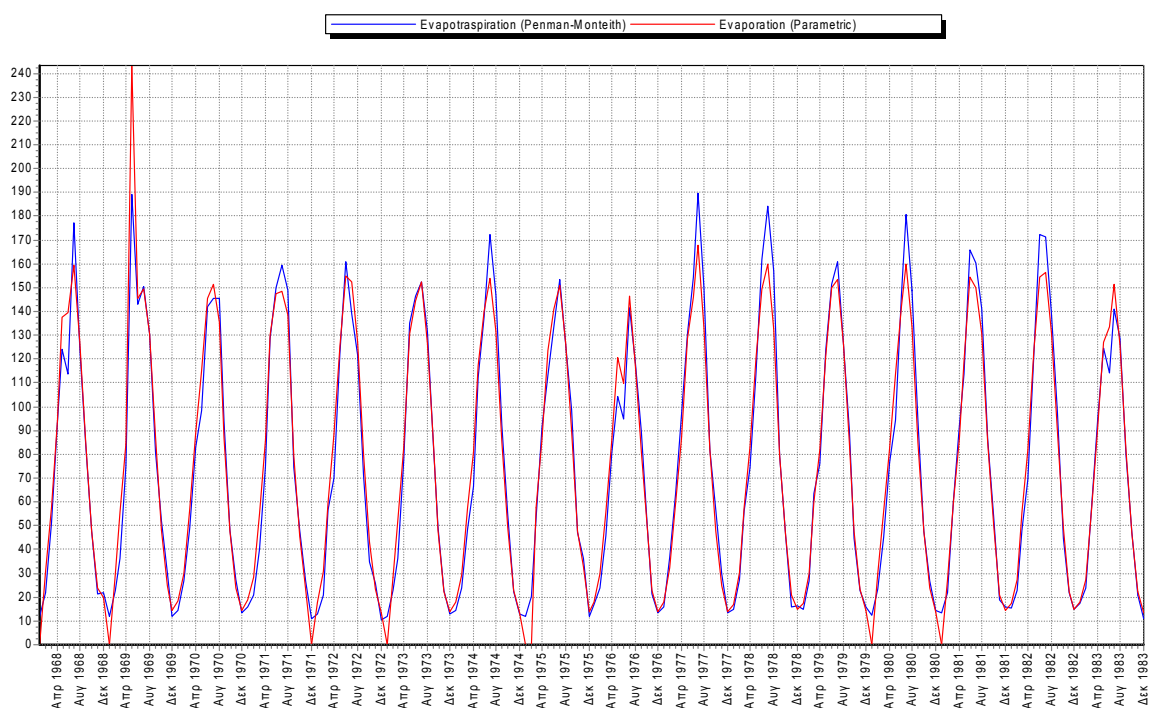
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, 1999, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κοζάνης Σ, Χριστοφίδης Α., Ευστρατιάδης Α., 2005, *Περιγραφή συστήματος διαχείρισης και επεξεργασίας δεδομένων «Υδρογνώμων»*.
- Μπαλοδήμου- Αγατζά Α.Μ ,1991, *Θεωρία σφαλμάτων και Μ.Ε.Τ*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Μαμάσσης Ν., Κατακρημνίσματα και χωρική μεταβλητότητα τους, Σημειώσεις μαθήματος Προχωρημένης Υδρολογίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Kozanis, S., Chistofides, A, Mamassis N., Efstratiadis A. and Koutsoyiannis D., 2005, *Hydrognomon- A hydrological data management and processing software tool*, 2nd General Assembly of the European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts Vol.7, Vienna, 04644, E.G.U.
- Jensen M, Haise H, *Estimating evapotranspiration from solar radiation*, Journal of the Irrigation and drainage division ASCE, 1963.
- McGuinness J.L, Bordne E.F, 1972, *A comparison of lysimeter- derived potential evapotranspiration with computed values*, Agricultural Research Service, Washington.
- Oudin L, Hervieu F, Michel C., Perrin C.,2004, *Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall- runoff model?*, Journal of Hydrology
- Linacre E. 1977, *A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone*, Agricultural Meteorology.
- Hargreaves G.H, Samani Z.A, 1982, *Estimating potential evapotranspiration*. Technical note. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 108(3), 225-300.
- Penman H.L, 1948. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proceedings of the Royal Society of London 193, 120-145.
- Monteith J.L, 1965, *Evaporation and the environment. The state and movement of water in living organism*, XIXth symposium. Cambridge University Press, Swansea.
- Blaney H.F, Criddle W.D, 1950. *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. Technical Paper No 96, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC.
- Doorenbos J., Pruitt W.O, 1977. *Crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper No 24, FAO, Rome.
- Thornwaite C.W, 1948. *An approach towards a rational classification of climate*. Geographical review 38, 55-94.
- Priestley C.H.B, Taylor R.J, 1972. *On the assessment of surface heat fluxes and evaporation using large-scale parameters*. Montly Weather Review 100, 81-92

Nash J.E, Sutcliffe J.V, 1970, *River flow forecasting through conceptual models, part 1, a discussion of principles*, Journal of hydrology 10, 282-290.

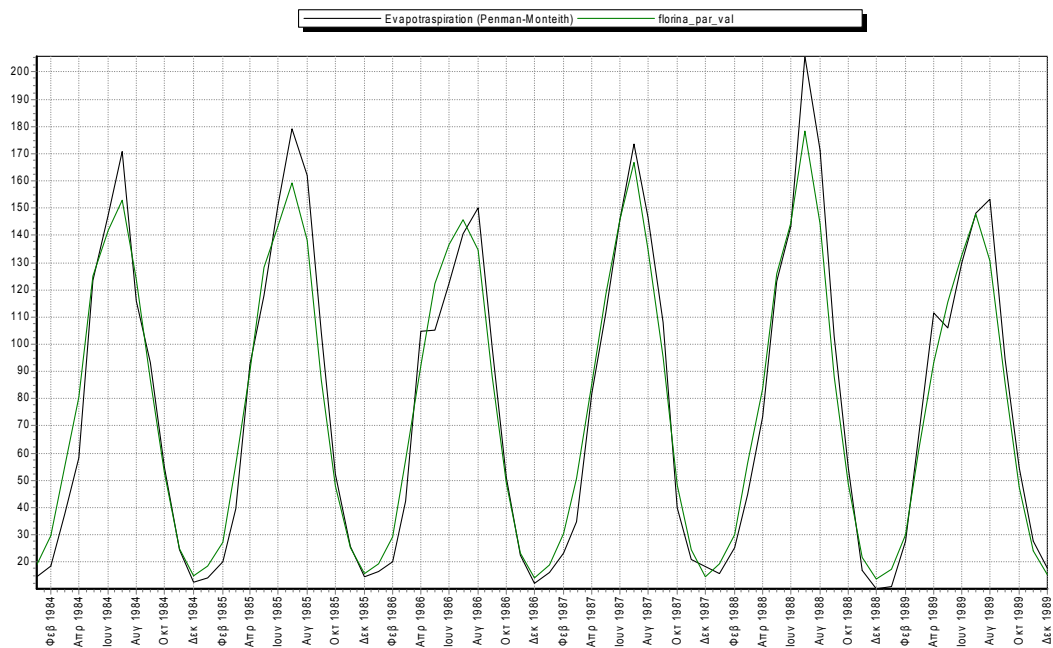
Koutsogiannis D. Mamassis N., Tegos A., 2007, *Logical and illogical exegeses of hydrometeorological phenomena in ancient Greece*, Water Science and Technology.

Παράρτημα

Φλώρινα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0,0000835	0,661	0,0196	96.7%	96%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000835	0	0.0196	94.1%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000554	0	0,02344	92.8%	-



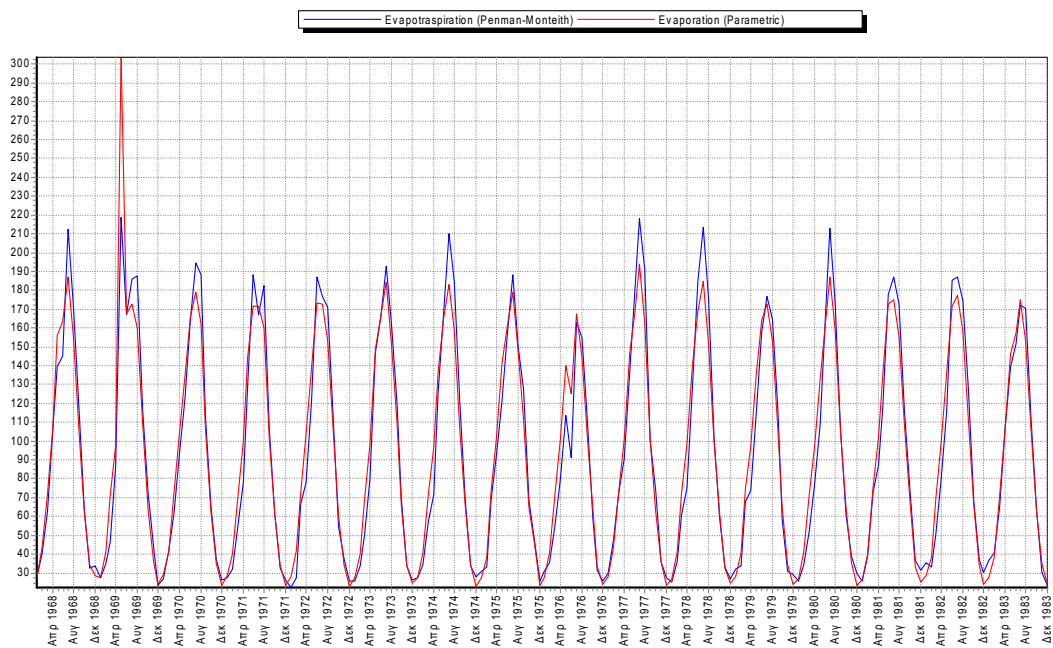
Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Φλώρινας



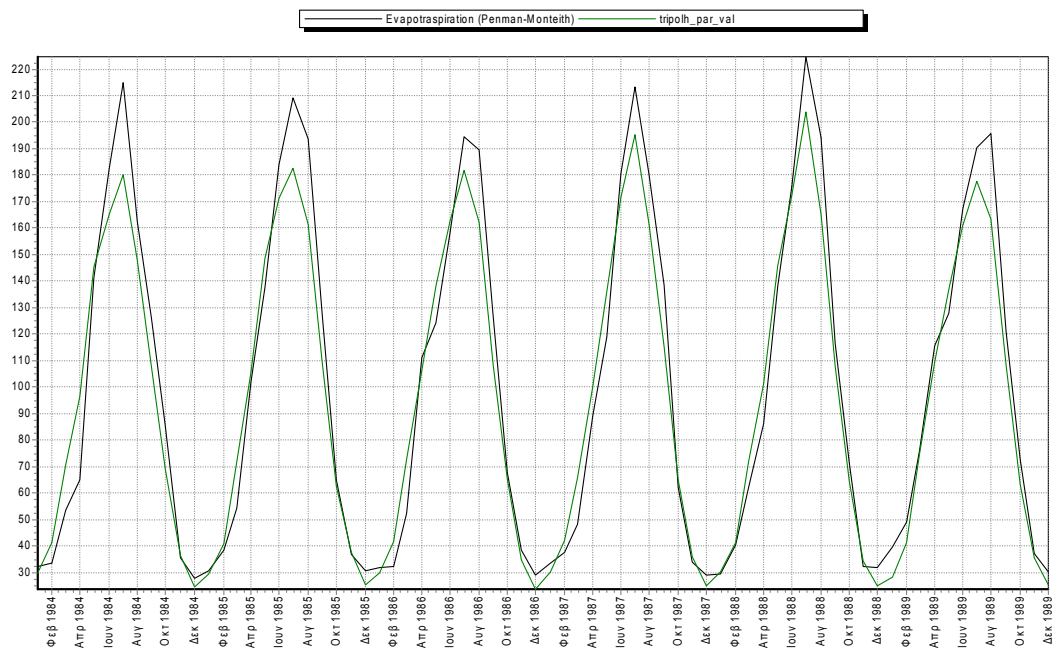
Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Φλώρινας

Τρίπολη	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.000977	0.805	0.0187	94.2%	95%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000713	0	0.01996	92%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000593	0	0,02344	82.3%	-

⋮

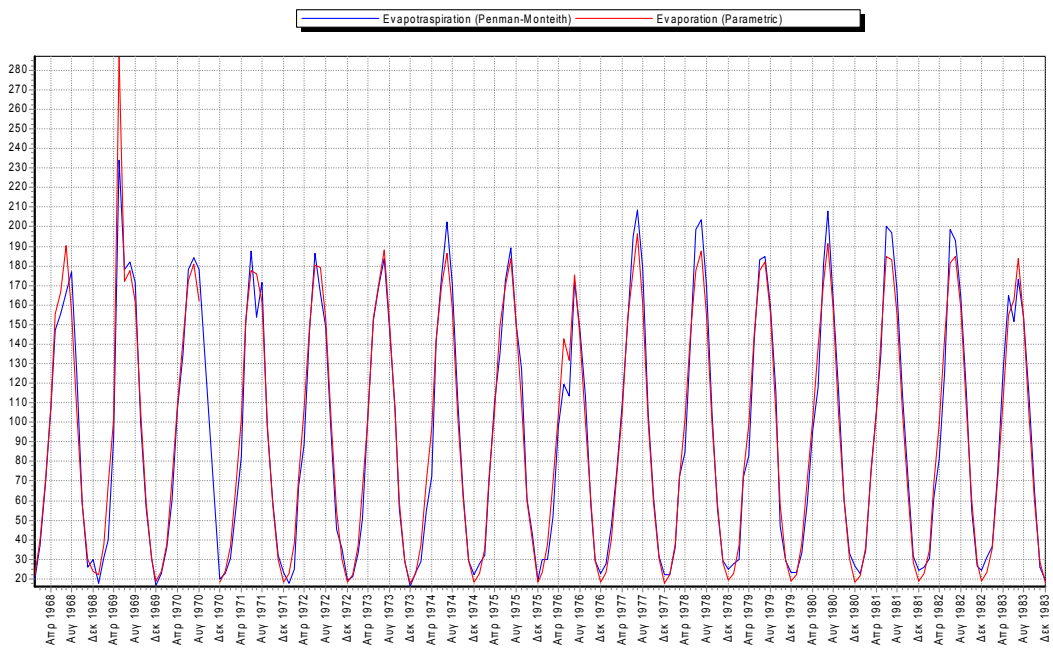


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Τρίπολης

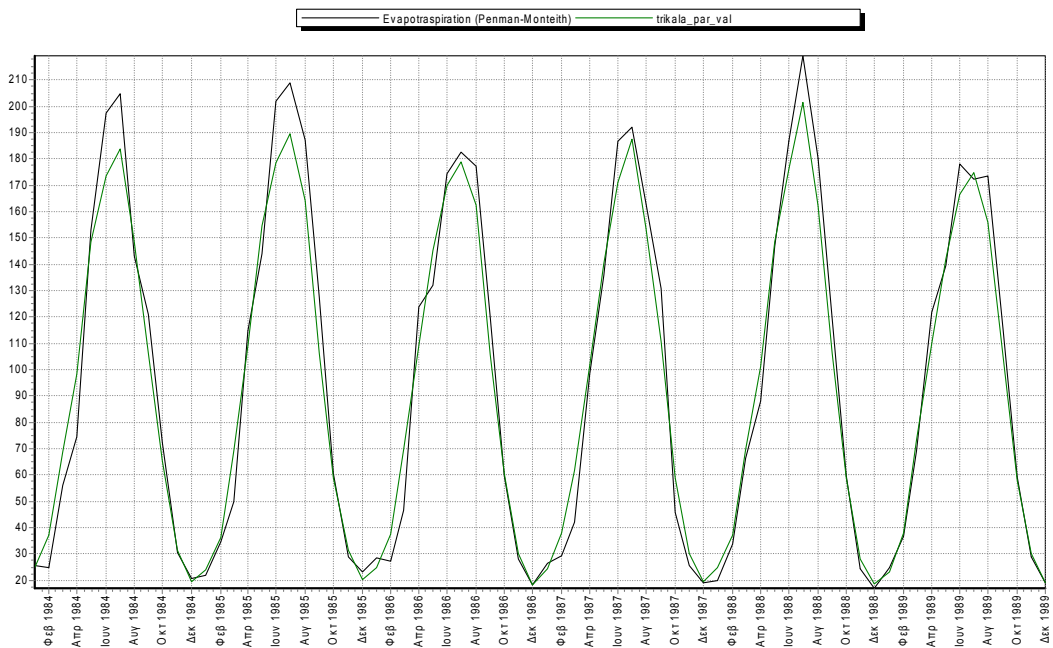


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Τρίπολης

Τρίκαλα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0,0000976	0,829	0,0172	97%	97.3%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000686	0	0.01886	94.5%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000047	0	0,02344	62.8%	-

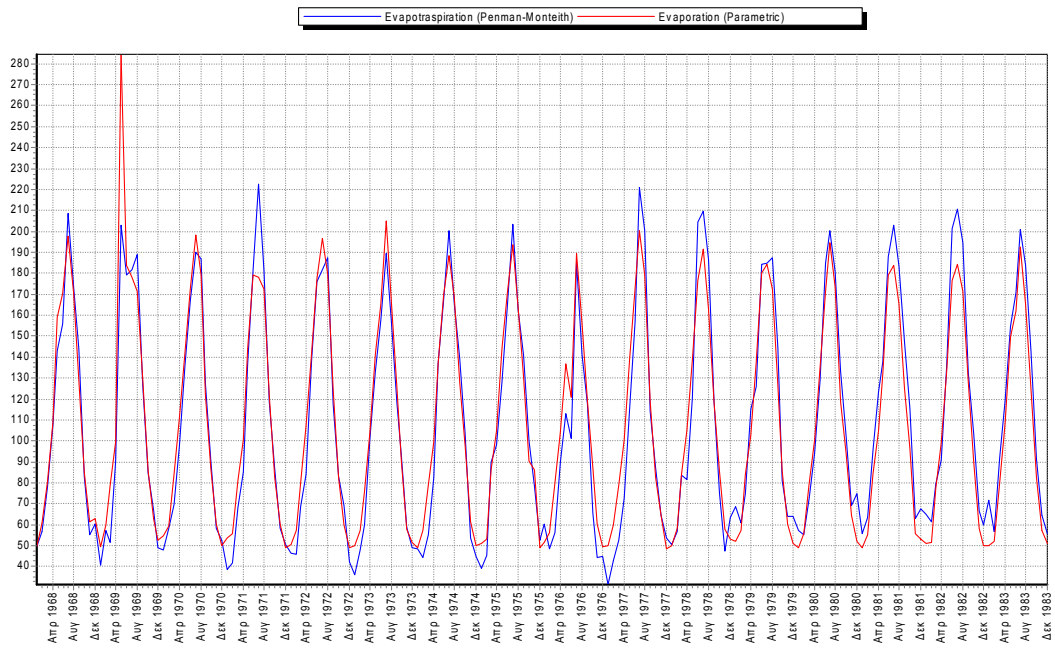


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό των Τρικάλων

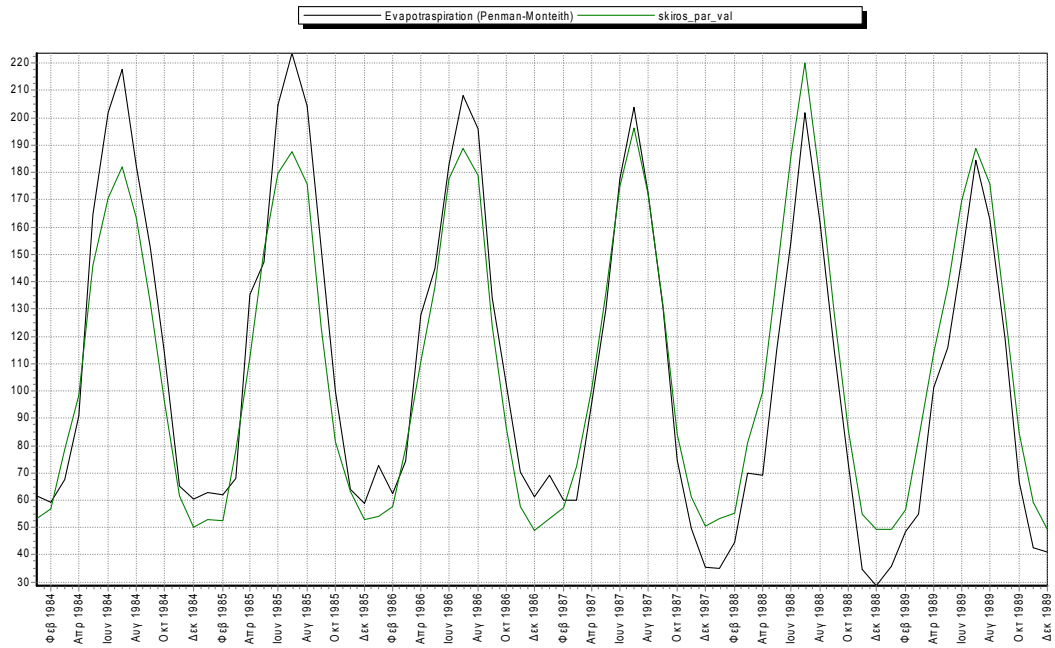


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό των Τρικάλων

Σκύρος	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000523	-0.448	0.023	96.2%	91%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000691	0	0.02173	92.3%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000637	0	0.02344	91.7%	-

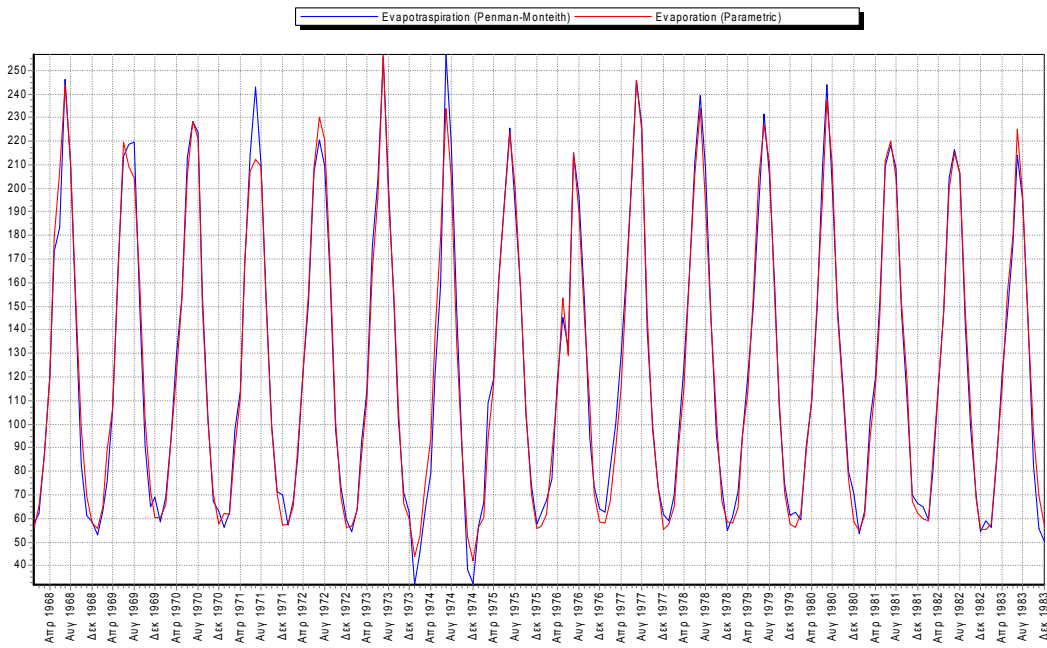


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Σκύρου

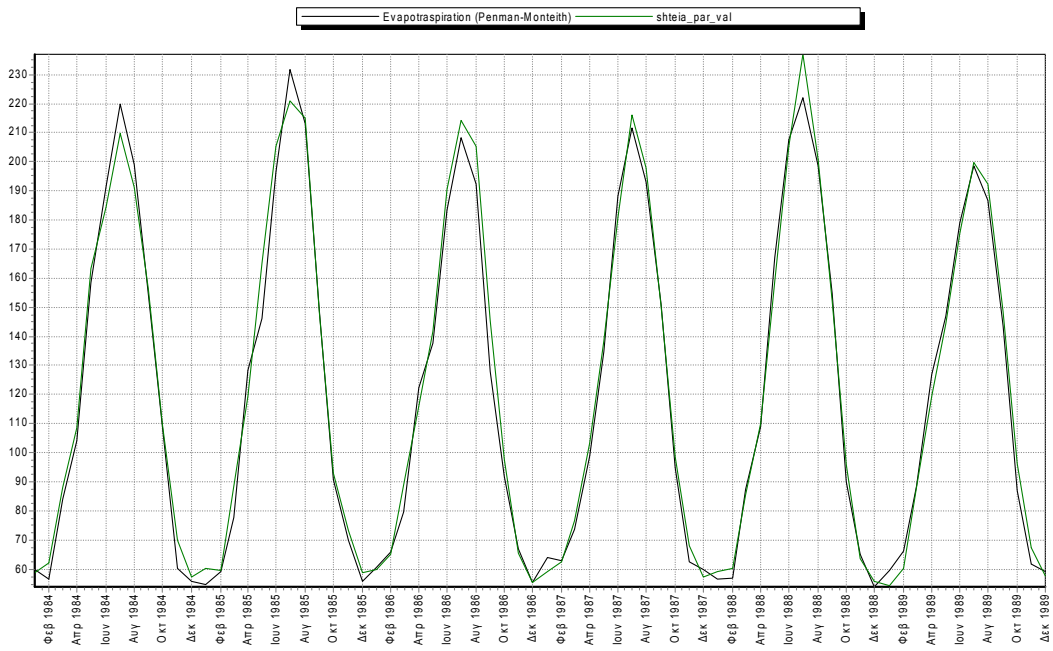


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Σκύρου

Σητεία	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000507	-0.358	0.0256	98.5%	99%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000646	0	0.02465	98%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000069	0	0.02344	97.9%	-

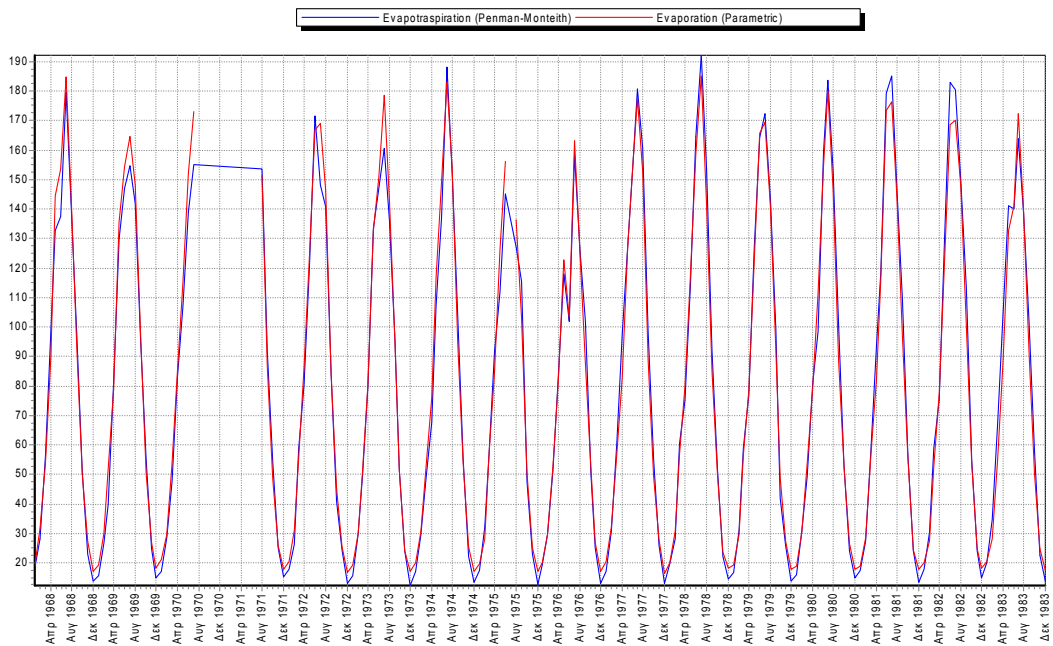


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Σητείας

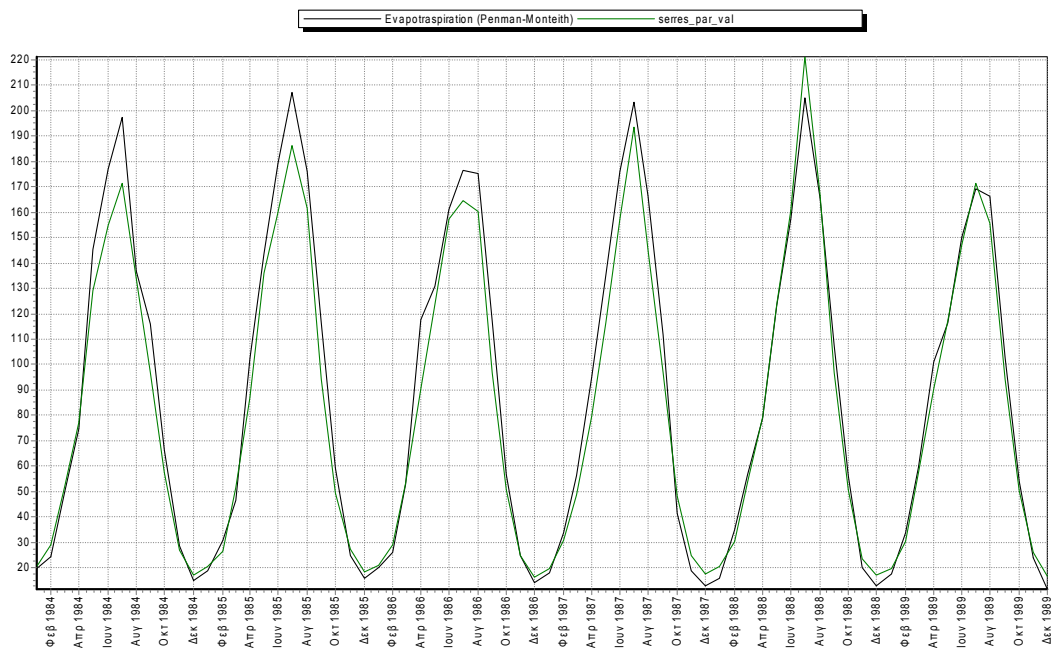


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Σητείας

Σέρρες	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000626	0.314	0.0234	98.2%	97%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000491	0	0.02518	98.1%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000537	0	0.02344	97.9%	-

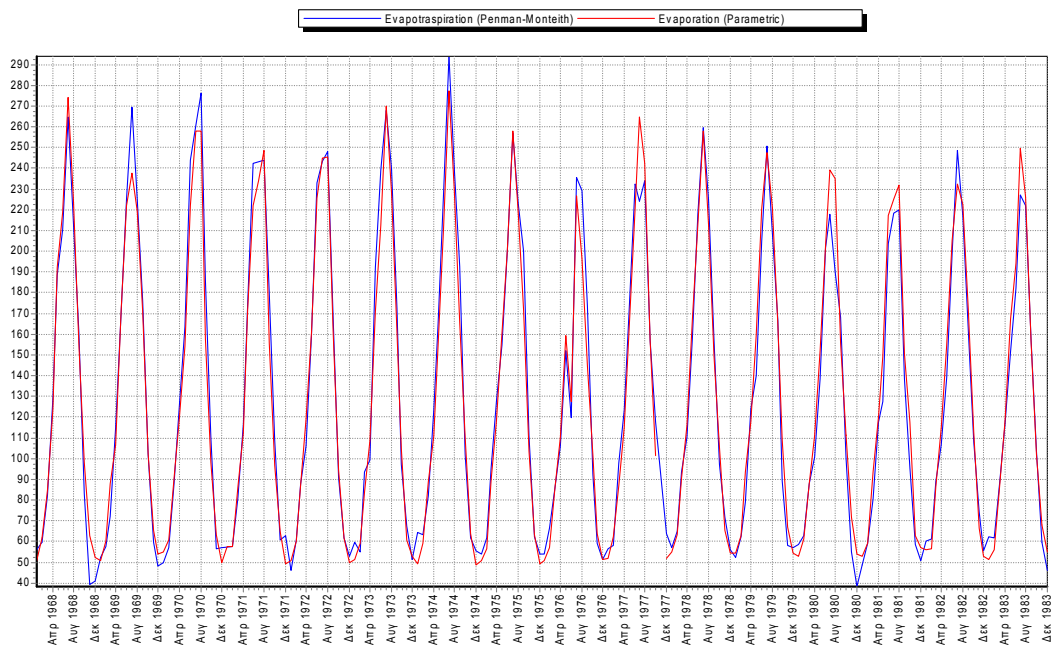


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό των Σερρών

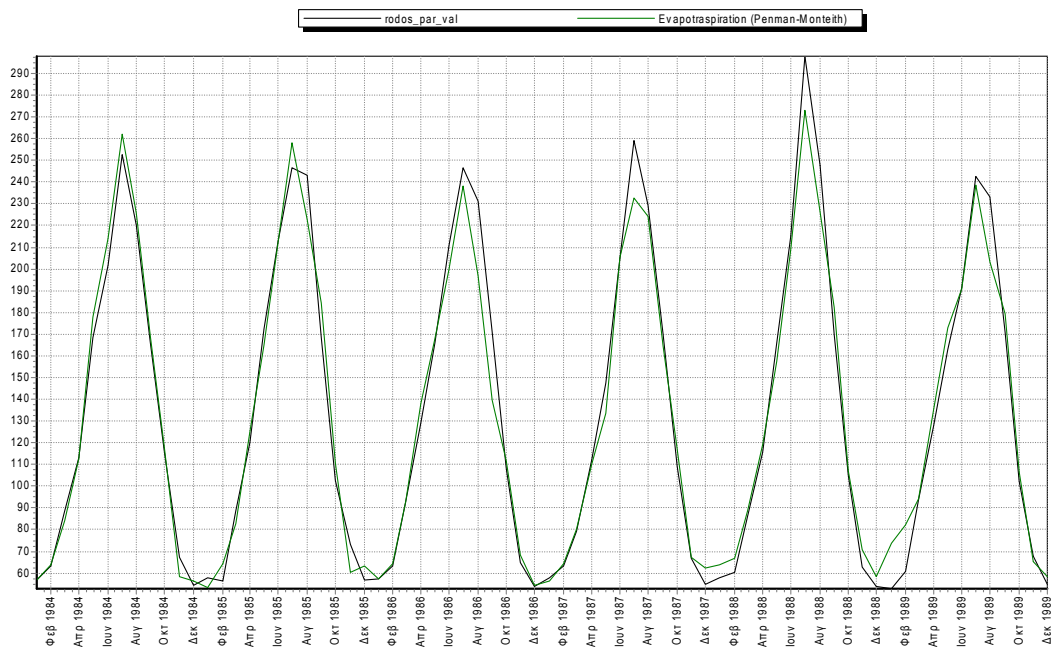


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό των Σερρών

Ρόδος	a	b	c	Recalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000554	-0.242	0.0258	97.2%	97%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.000064	0	0.02541	97%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000072	0	0.02344	96.4%	-

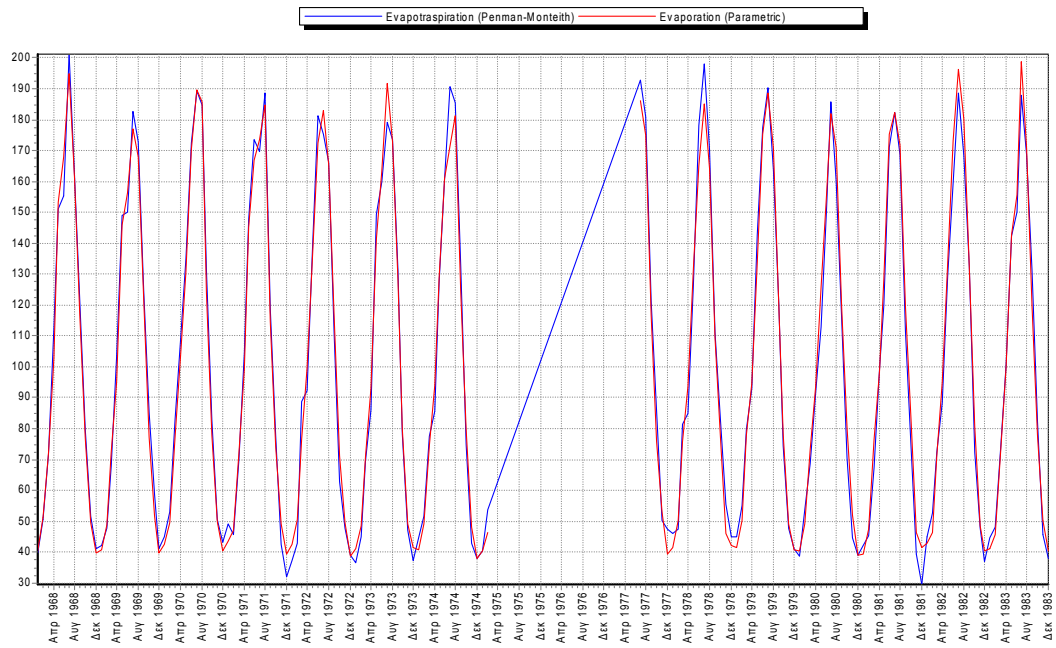


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Ρόδου

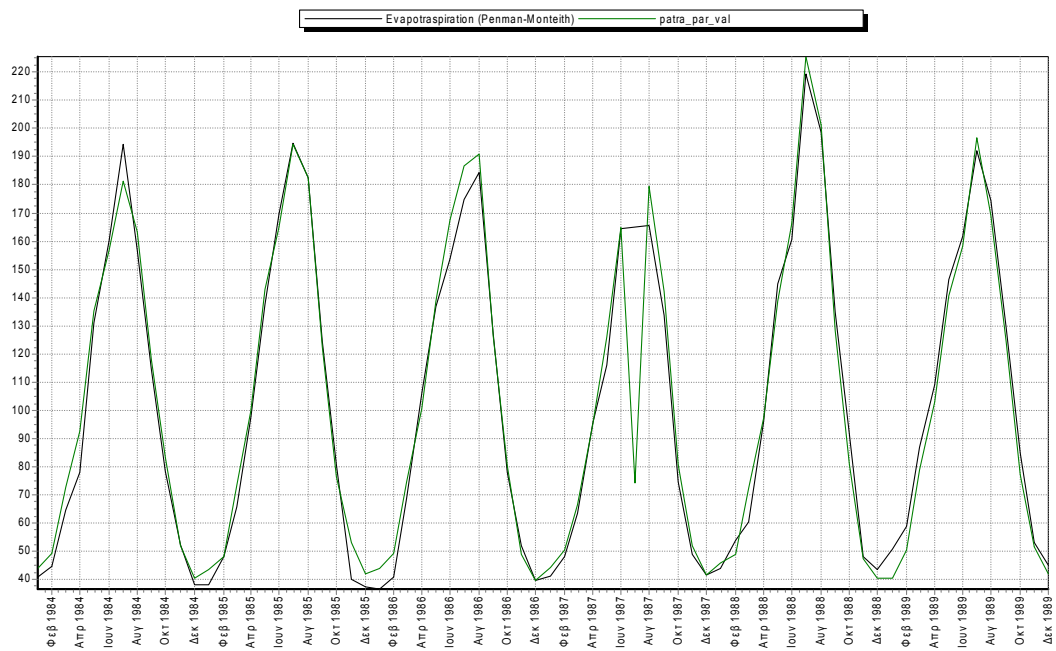


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Ρόδου

Πάτρα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000553	-0.145	0.0229	98.7%	96%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000609	0	0.02244	98.6%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000553	0	0.02344	98.6%	-

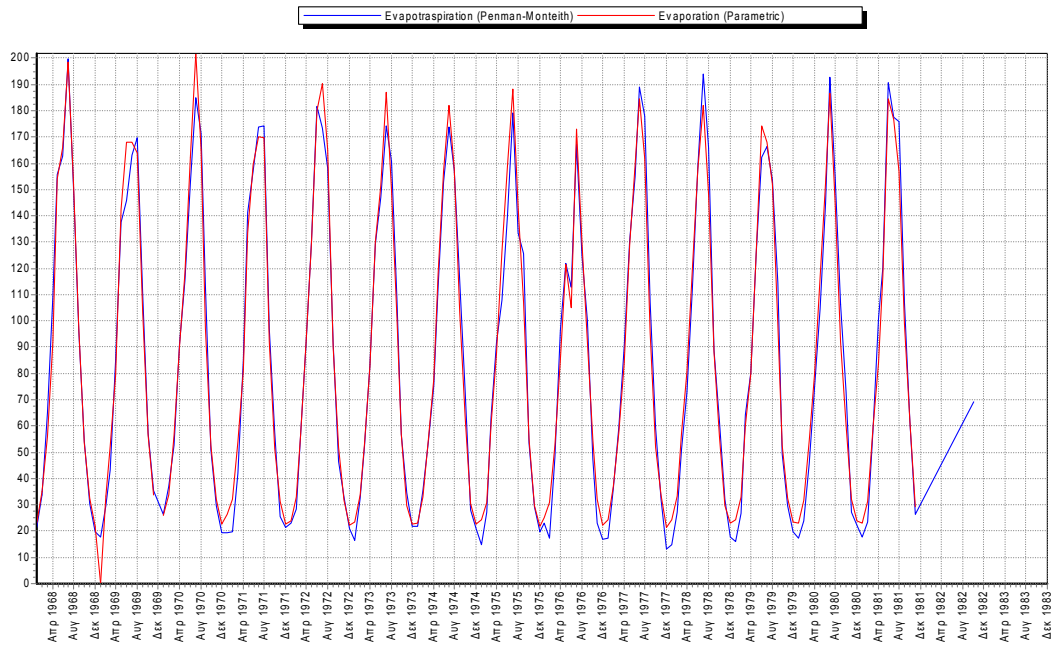


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό των Πατρών

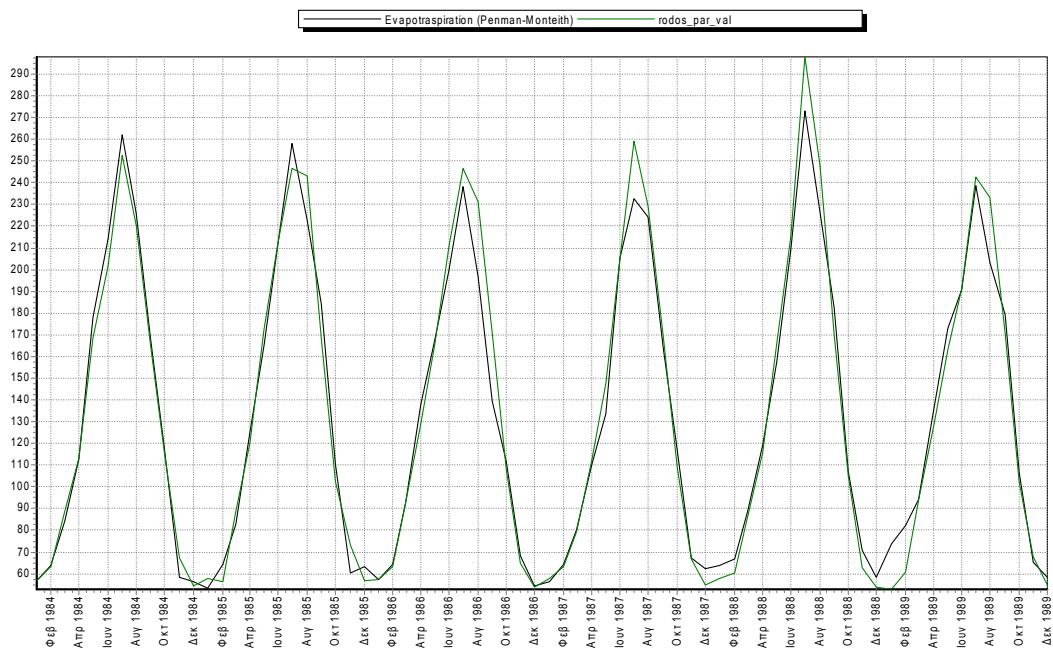


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό των Πατρών

Ορεστιάδα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000562	0.058	0.0246	98.1%	97%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000531	0	0.02508	98.1%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000577	0	0.02344	97.8%	-

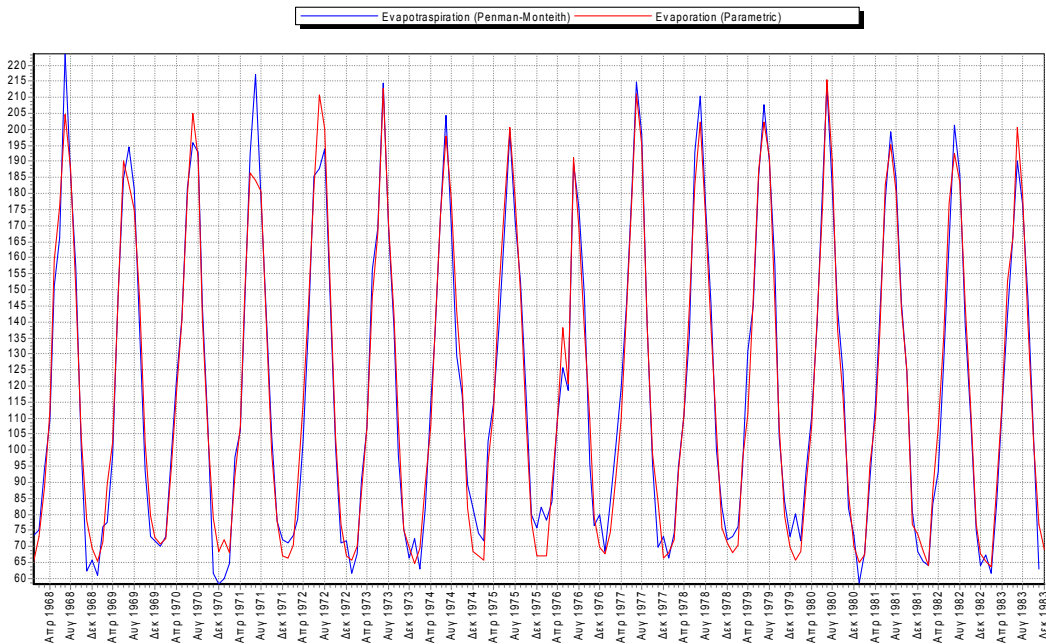


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Ορεστιάδας

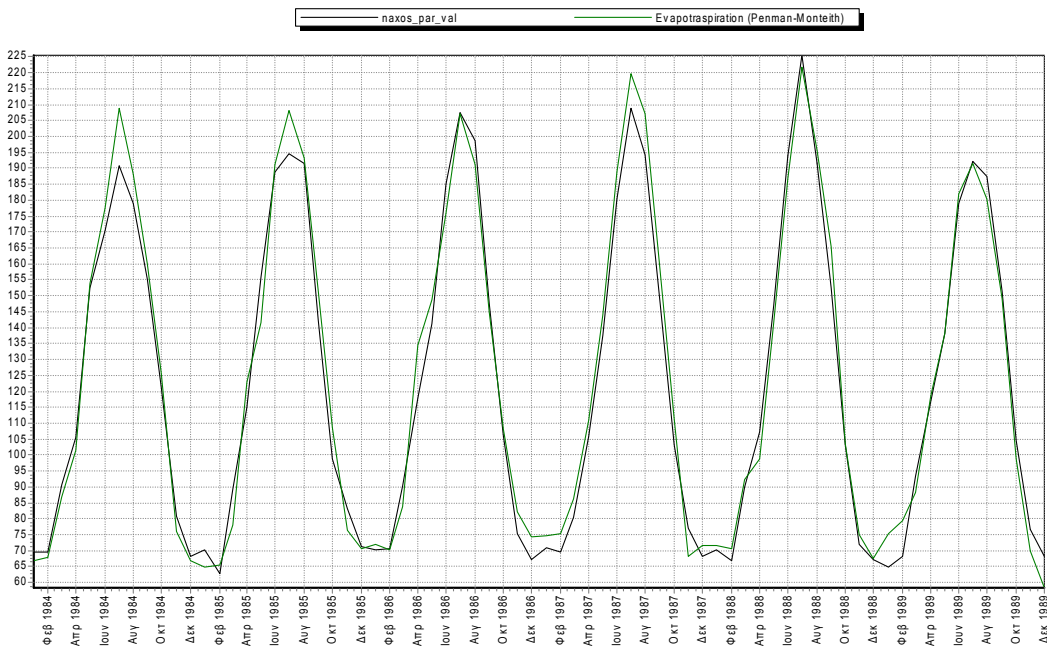


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Ορεστιάδας

Νάξος	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000356	-0,91	0.0256	97.5%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000784	0	0.02049	91.2%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000069	0	0.02344	90.1%	-

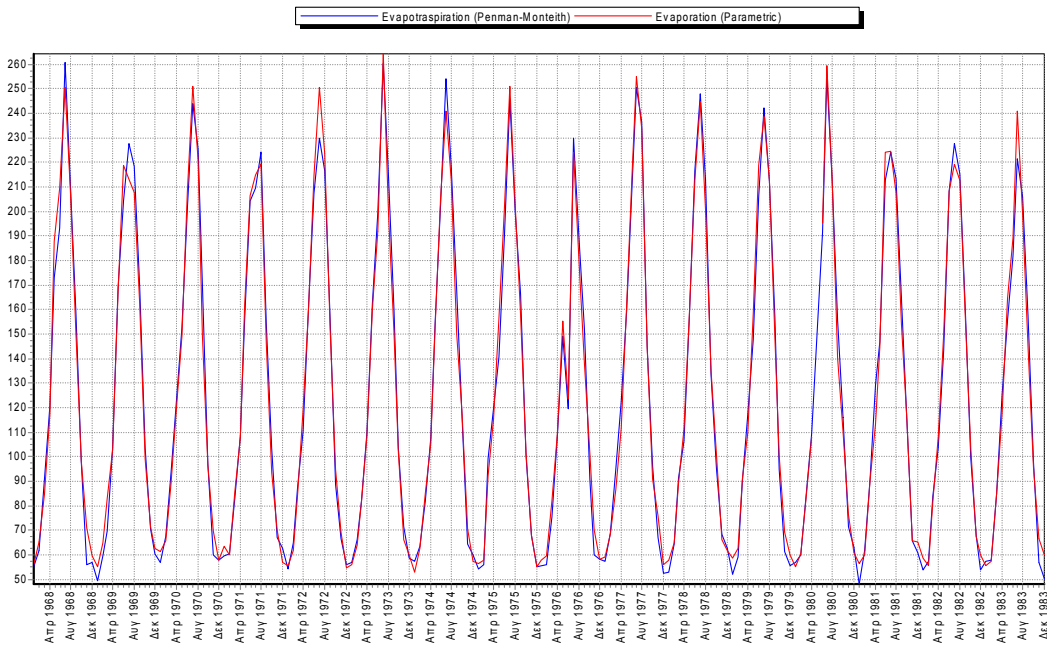


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Νάξου

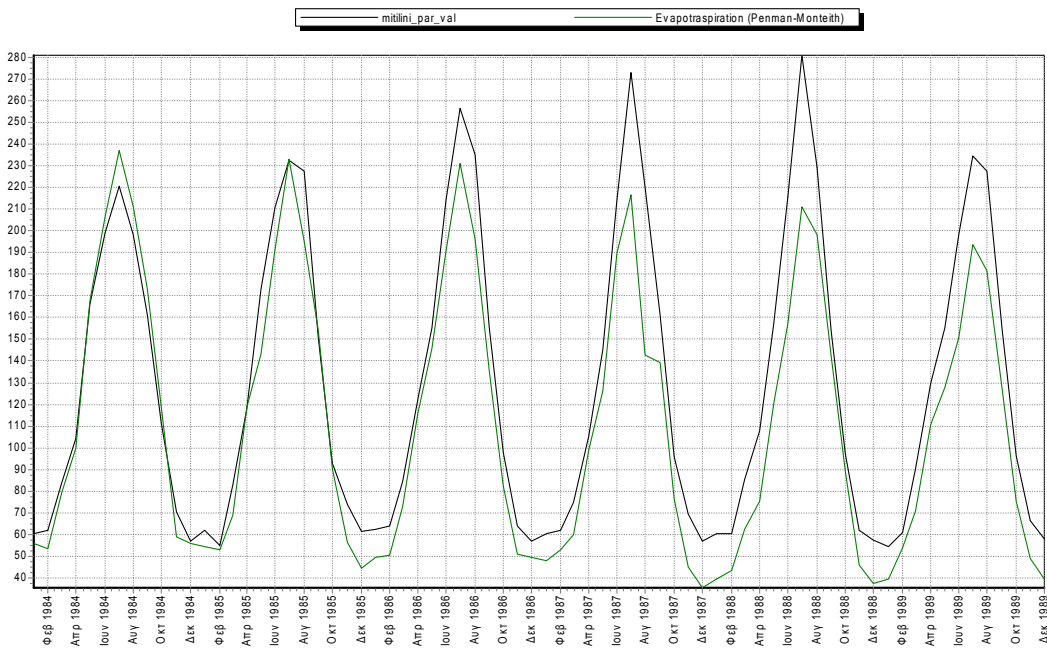


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Νάξου

Μυτιλήνη	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000419	-0.765	0.0258	98.8%	97%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000755	0	0.02277	96.5%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000729	0	0.02344	96.4%	-

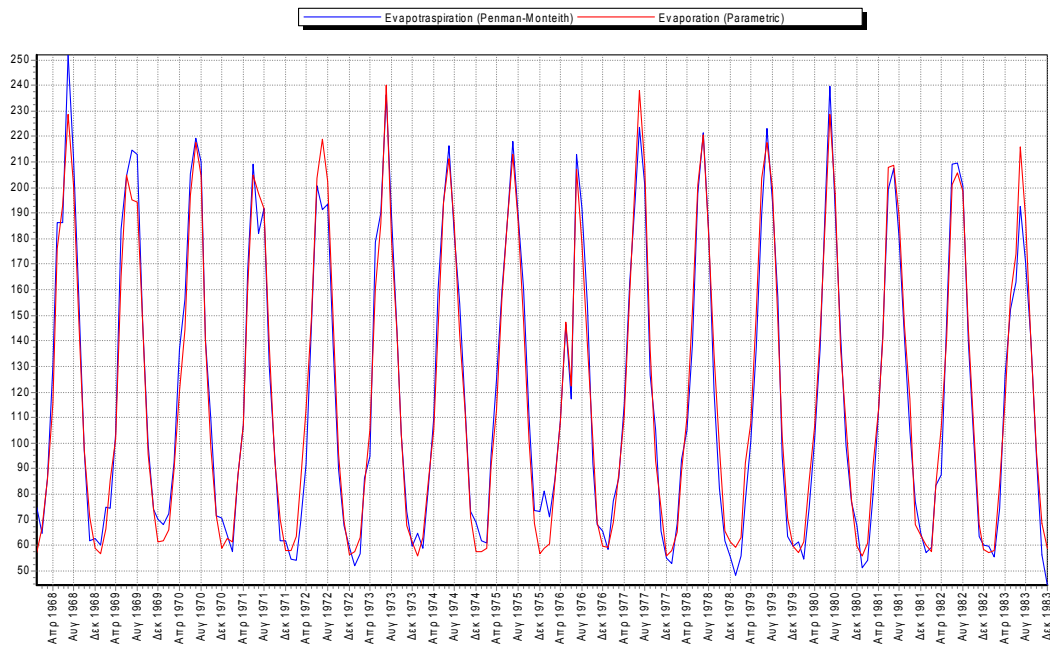


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Μυτιλήνης

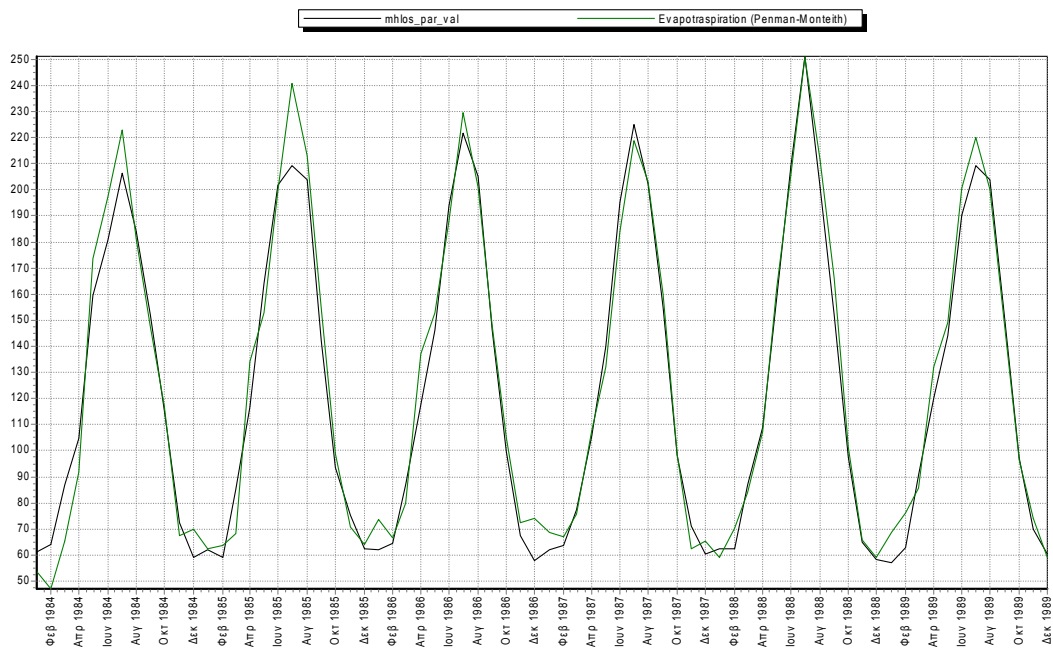


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Μυτιλήνης

Μήλος	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000473	-0.577	0.0257	97.2%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.000071	0	0.02349	96.1%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000712	0	0.02344	96.1%	-

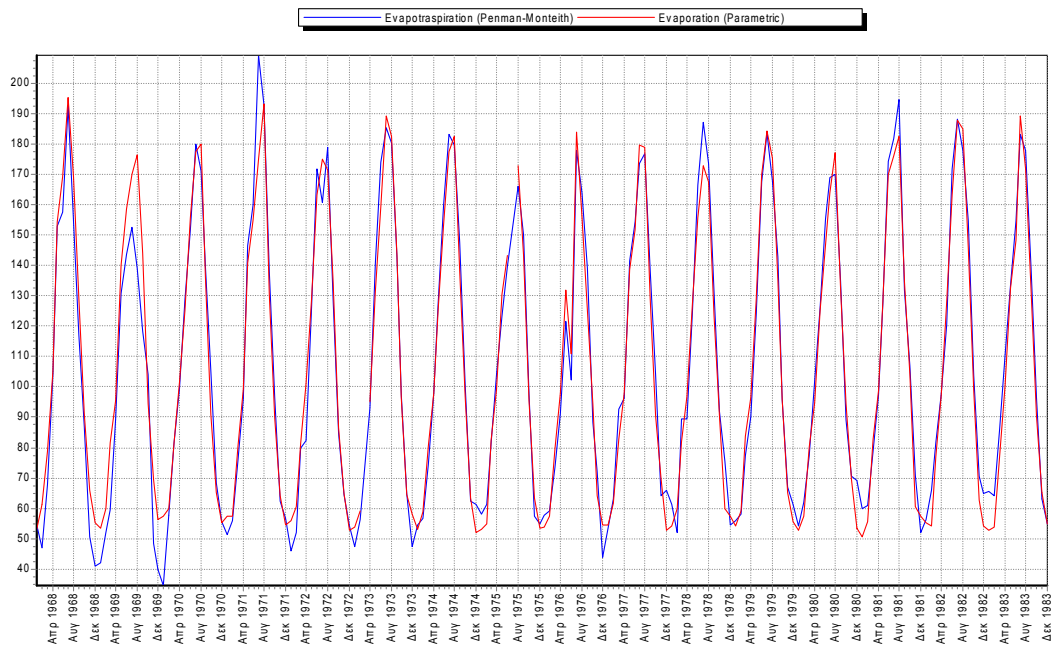


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Μήλου

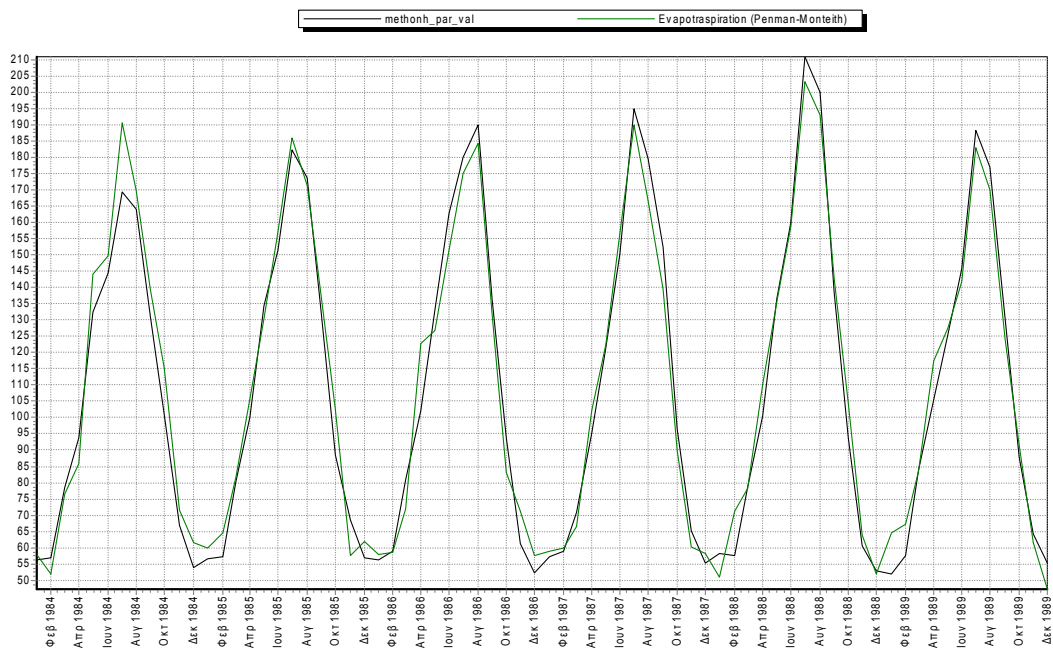


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Μήλου

Μεθώνη	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000423	-0.544	0.0248	96.2%	97%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.000064	0	0.02265	94.3%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000618	0	0.02344	94.2%	-

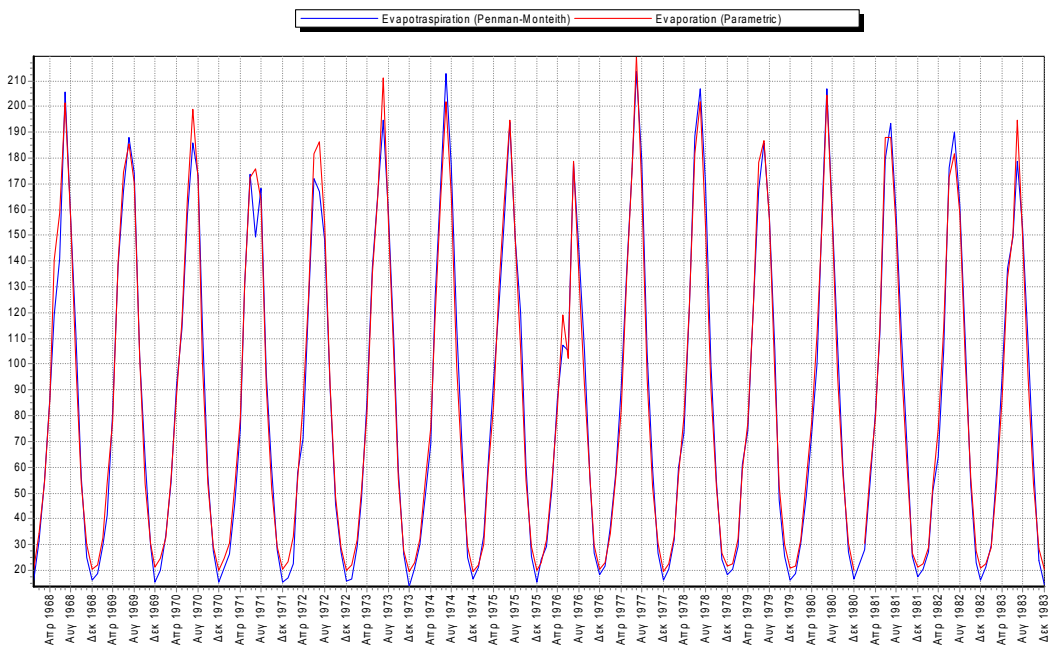


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Μεθώνης

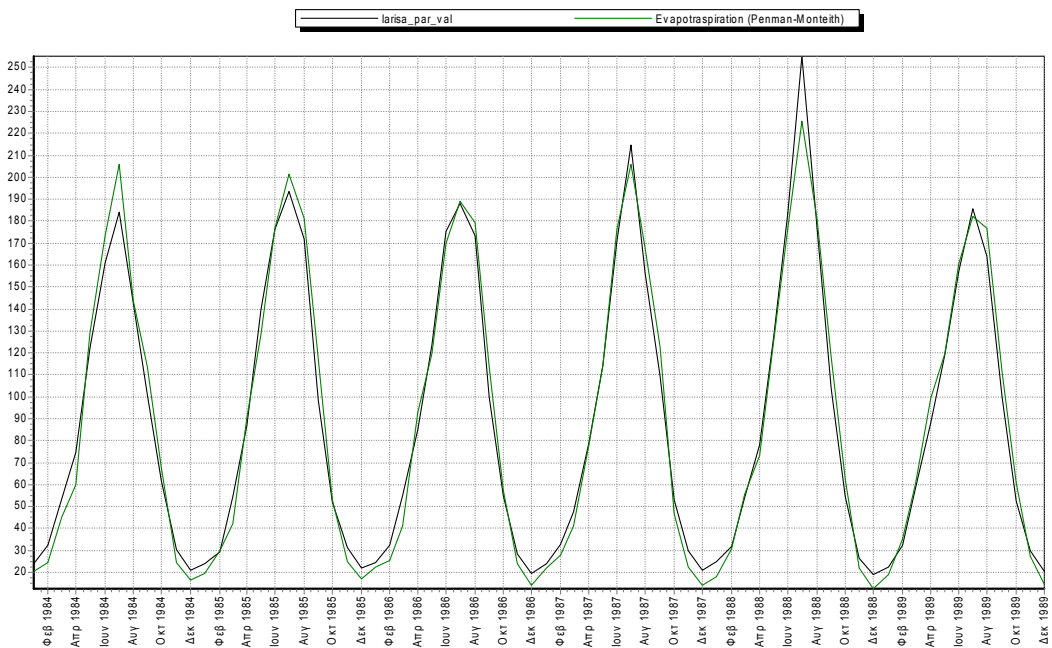


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Μεθώνης

Λάρισα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0,0000593	0,265	0,0244	98.7%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000481	0	0.02563	99%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000547	0	0.02344	98.6%	-

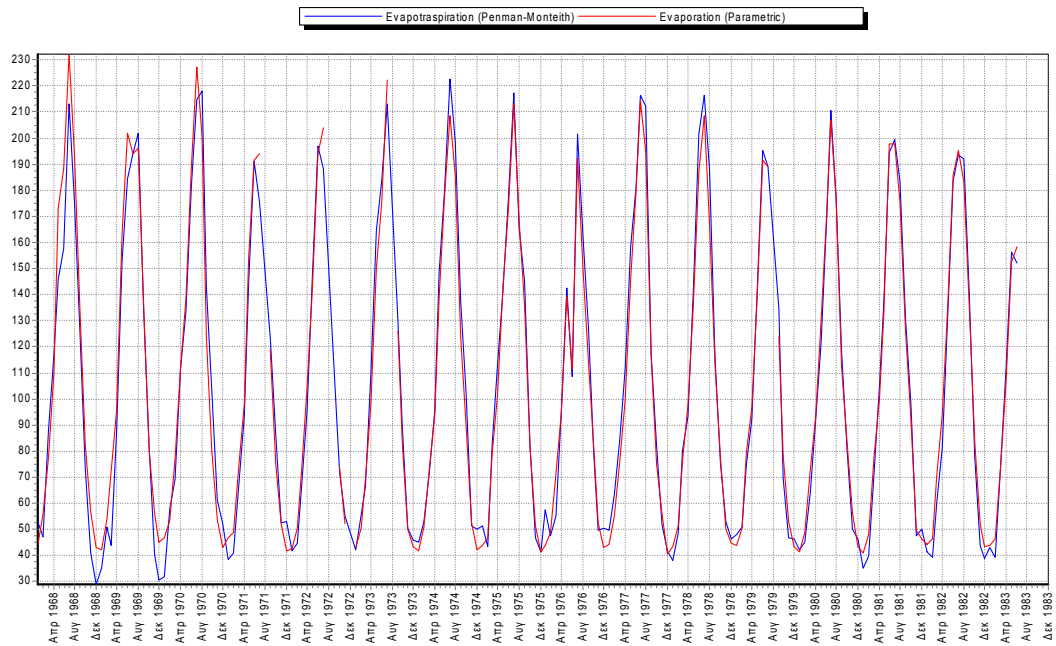


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Λάρισας

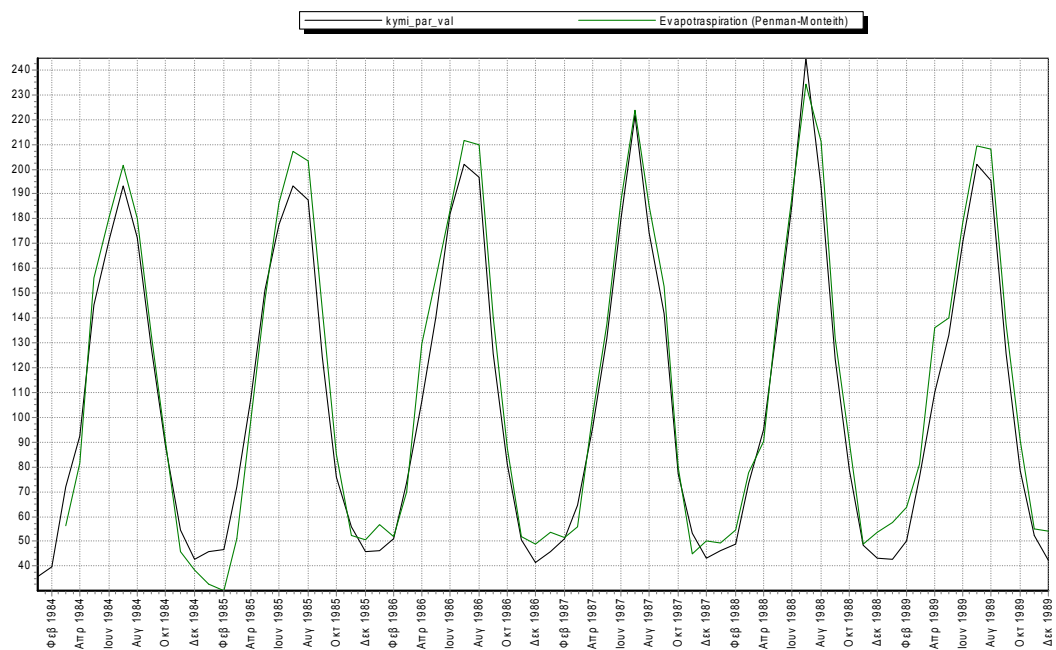


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Λάρισας

Κύμη	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000549	-0.266	0.0256	97.5%	91%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.000065	0	0.02476	97.3%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000069	0	0.02344	97.1%	-

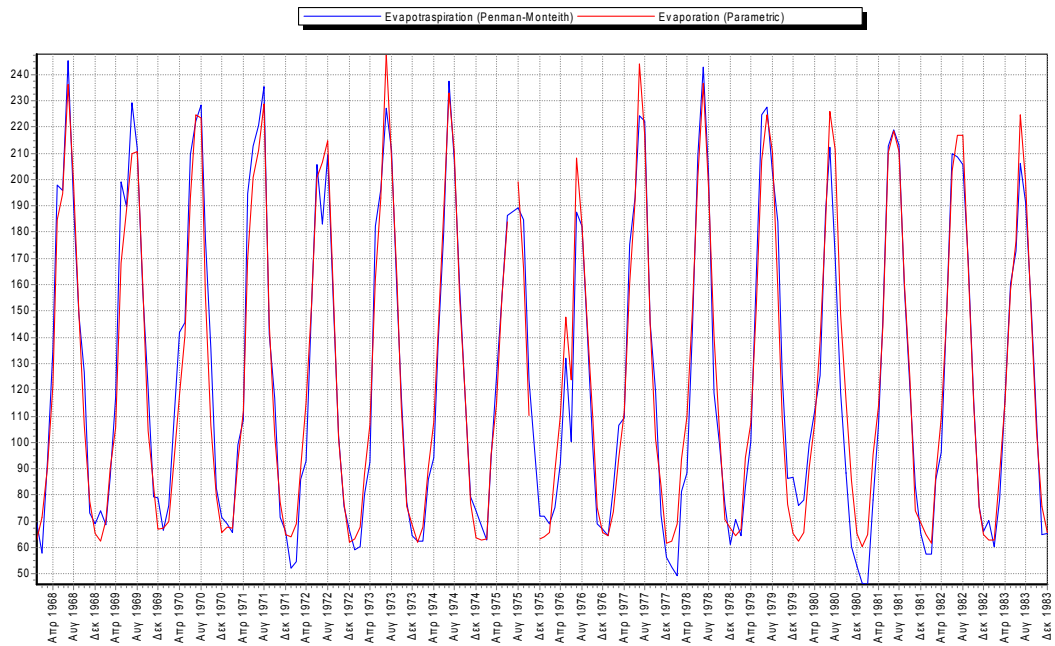


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Κύμης

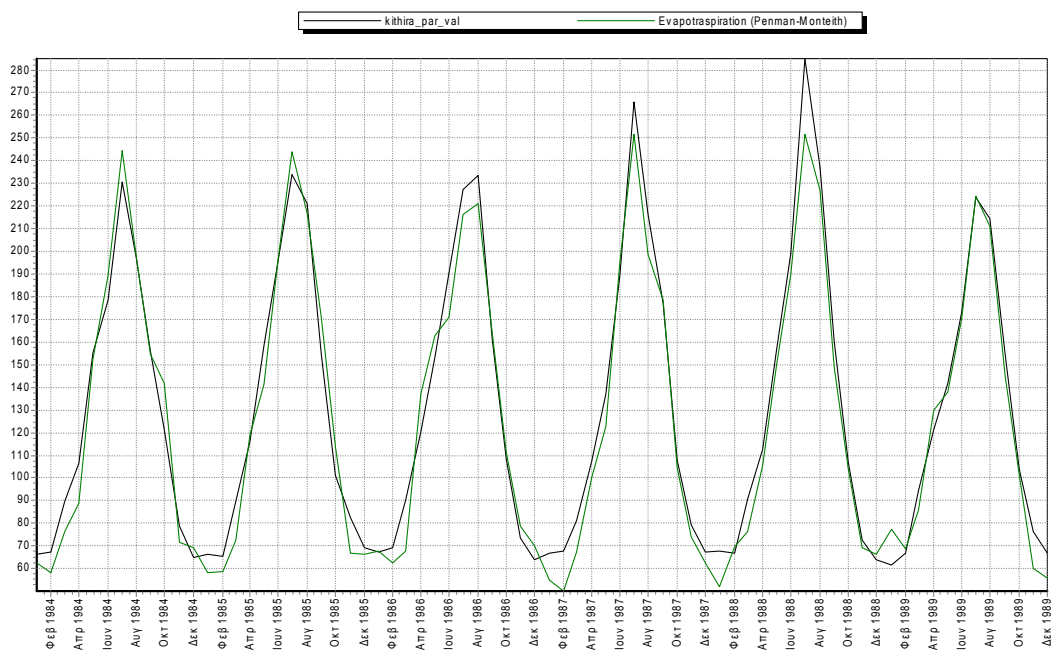


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Κύμης

Κύθηρα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0,0000463	-0,7	0,0255	95.7%	97%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000747	0	0.02304	93.7%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000734	0	0.02344	93.7%	-

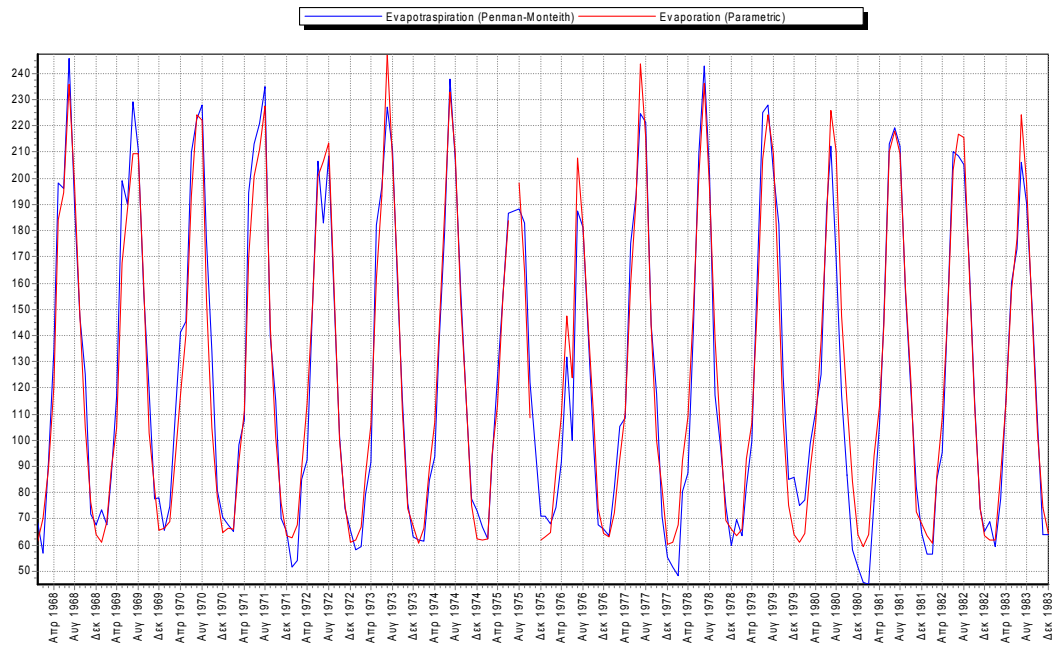


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό των Κυθήρων

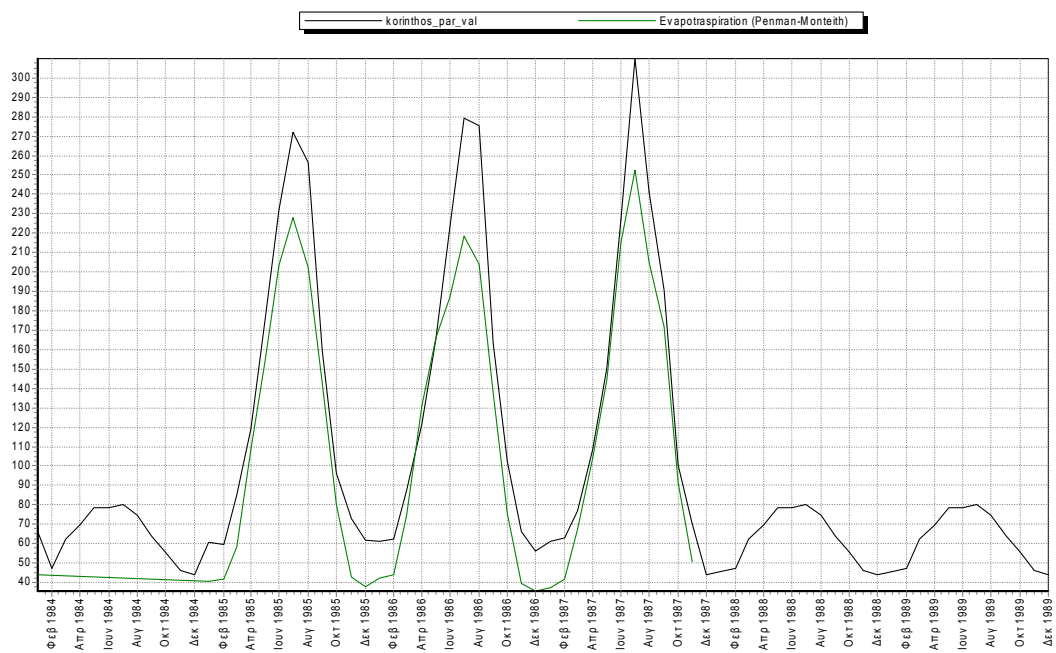


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό των Κυθήρων

Κόρινθος	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000453	-0,737	0.0255	95.7%	82%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.000077	0	0.02256	93%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000074	0	0.02344	92.9%	-

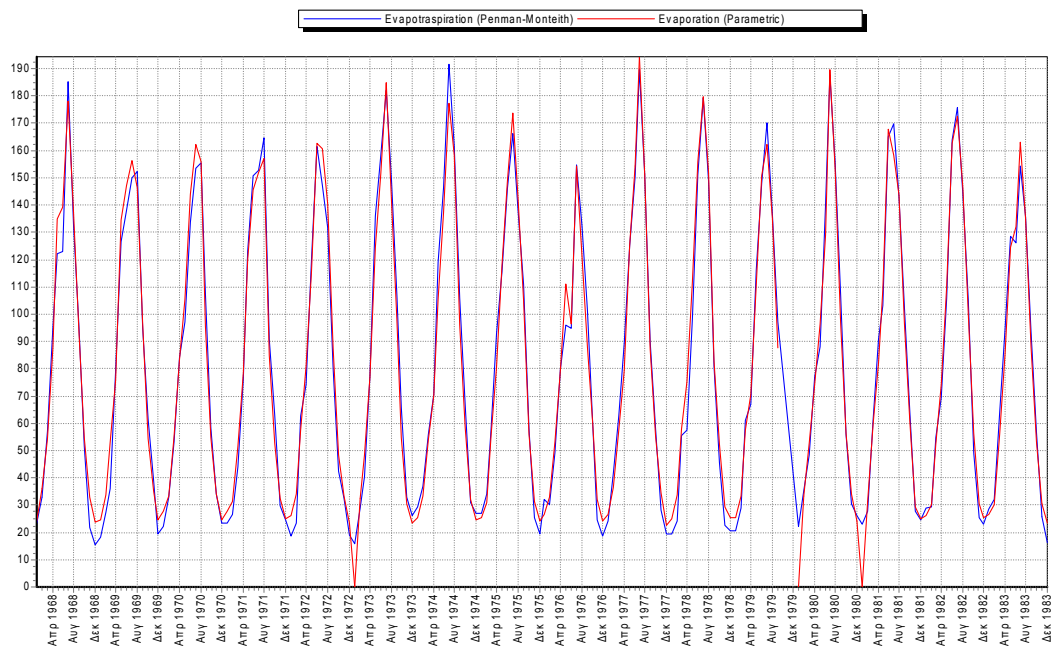


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Κορίνθου

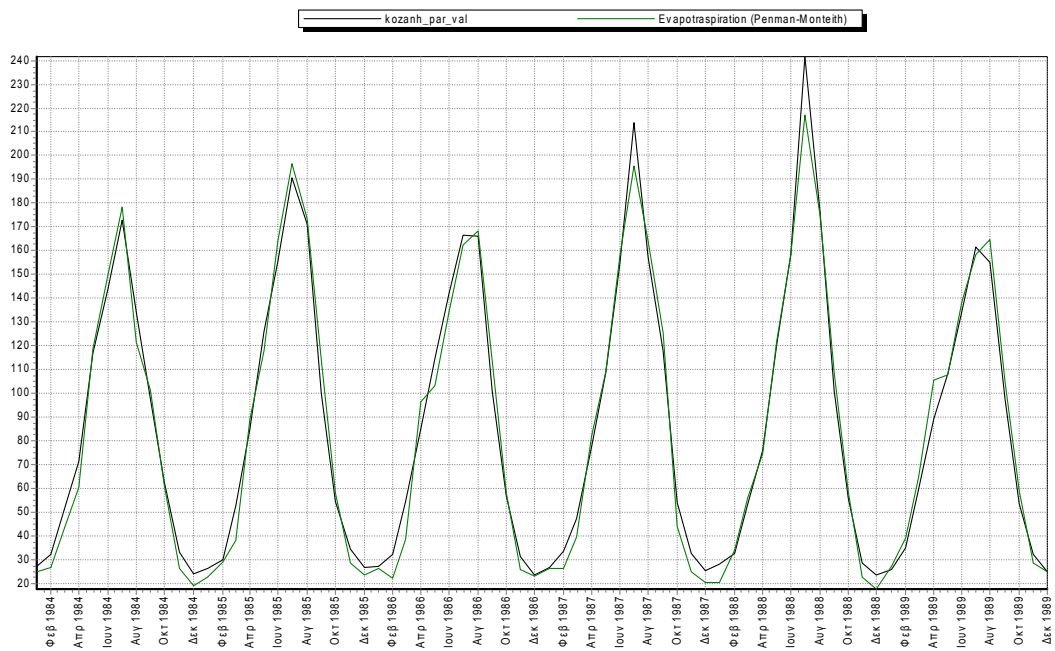


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Κορίνθου

Κοζάνη	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000535	0.007	0.0256	98.2%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000524	0	0.02599	98.4%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000583	0	0.02344	97.8%	-

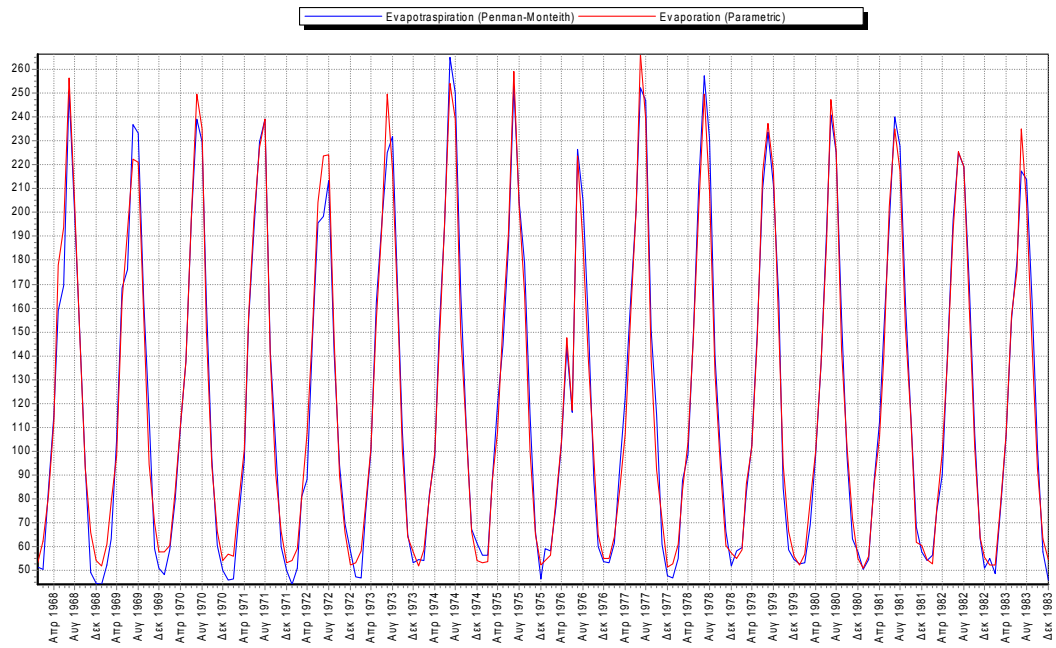


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Κοζάνης

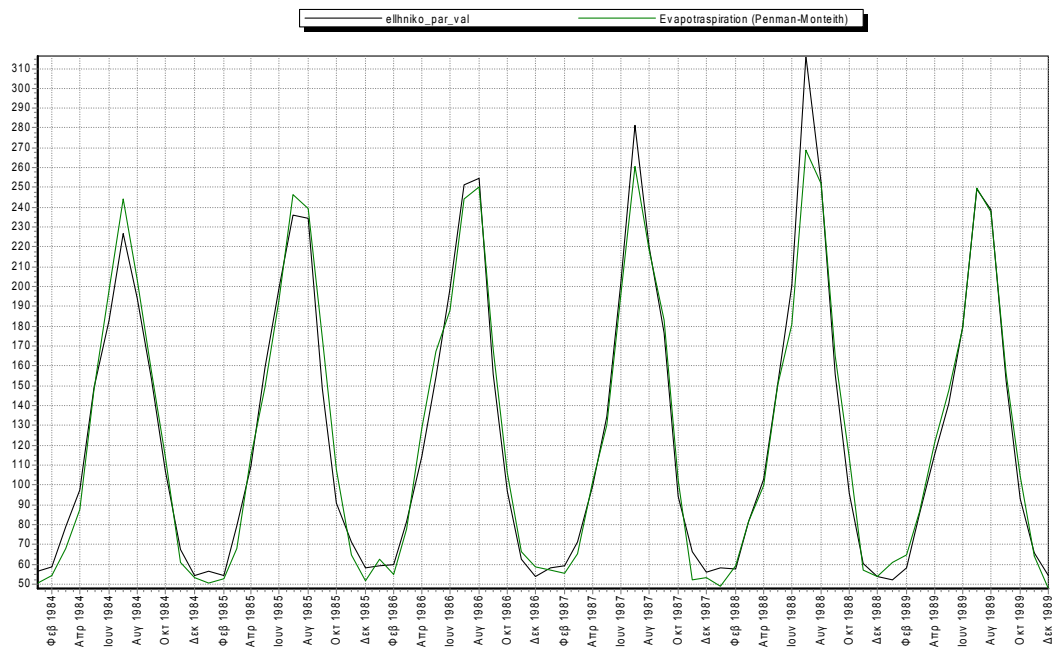


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Κοζάνης

Ελληνικό	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000417	-0.619	0.0256	98.3%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000656	0	0.02401	96.9%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000679	0	0.02344	96.9%	-

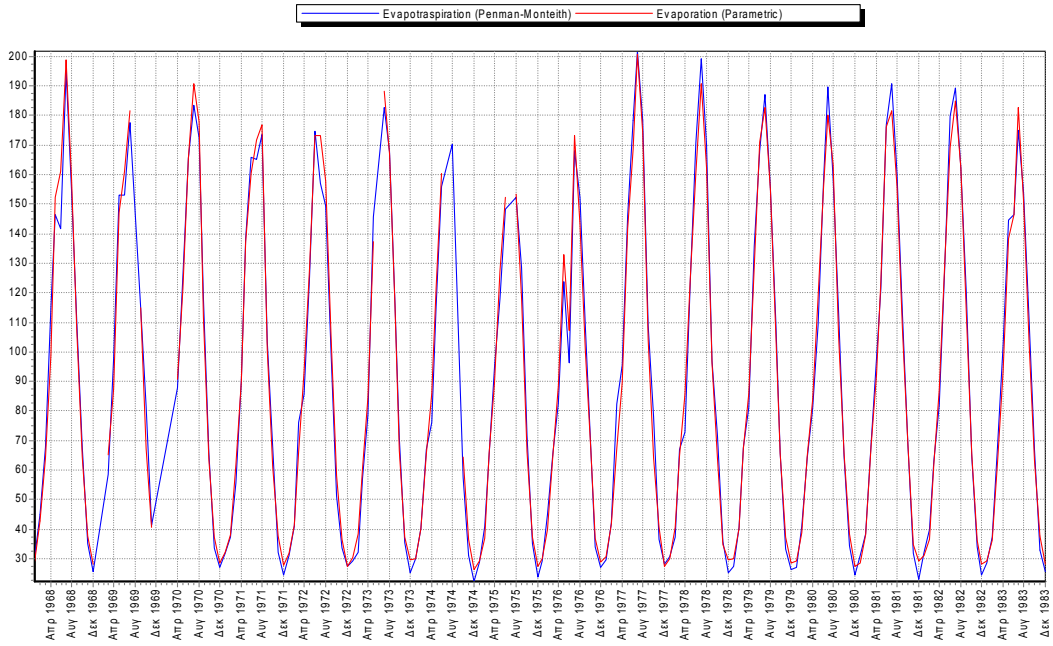


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό του Ελληνικού

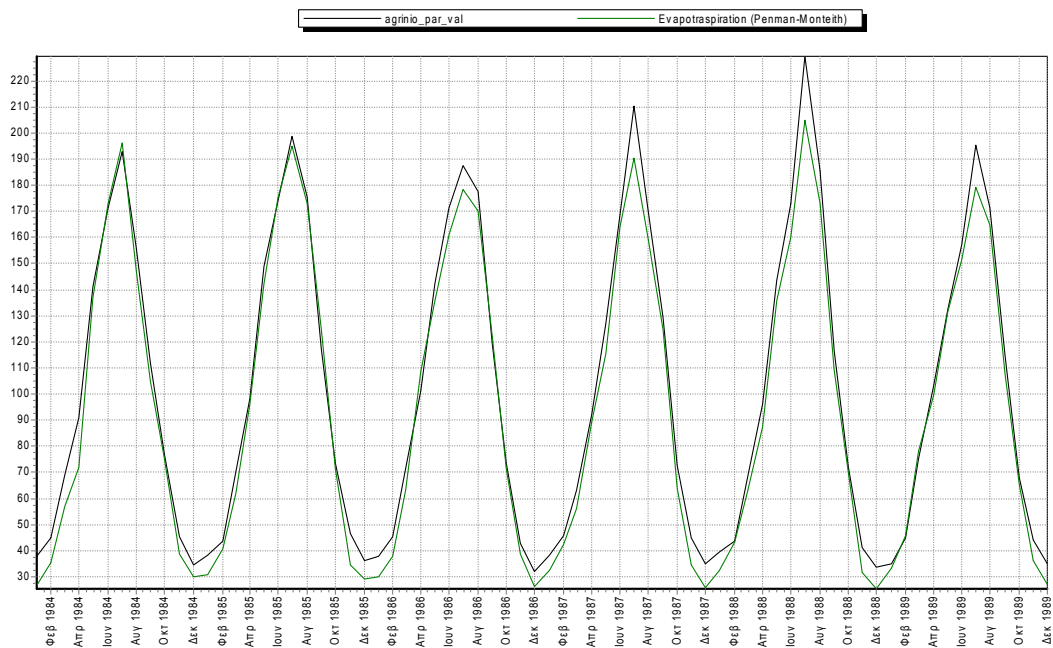


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό του Ελληνικού

Αγρίνιο	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000602	0.158	0.0231	98.9%	97.5%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.000053	0	0.024025	98.8%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000548	0	0.02344	99.6%	-

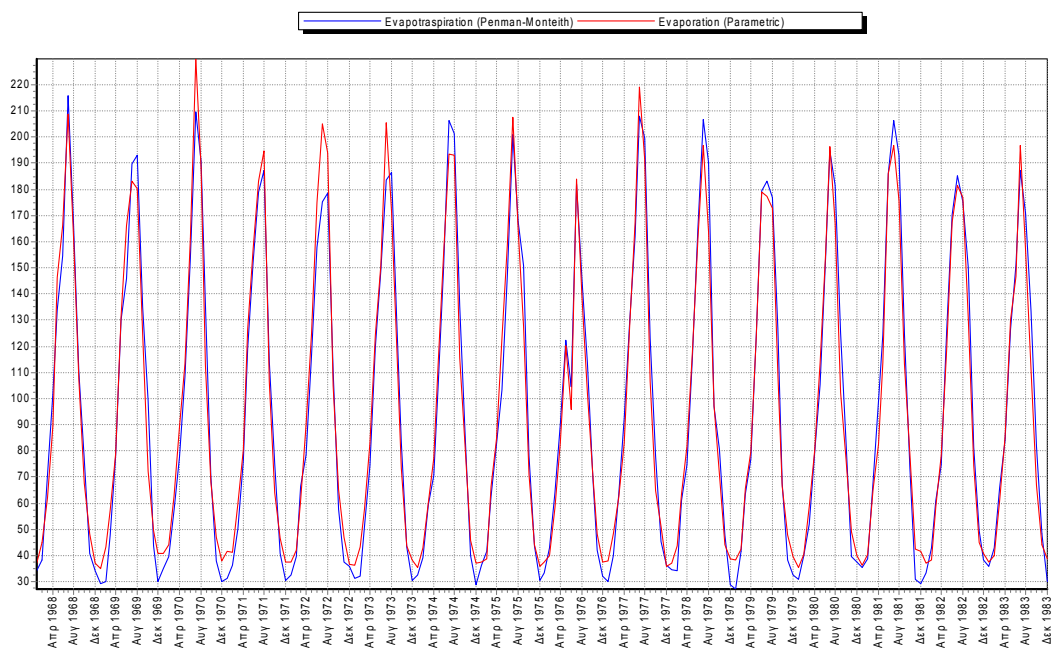


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό του Αγρινίου

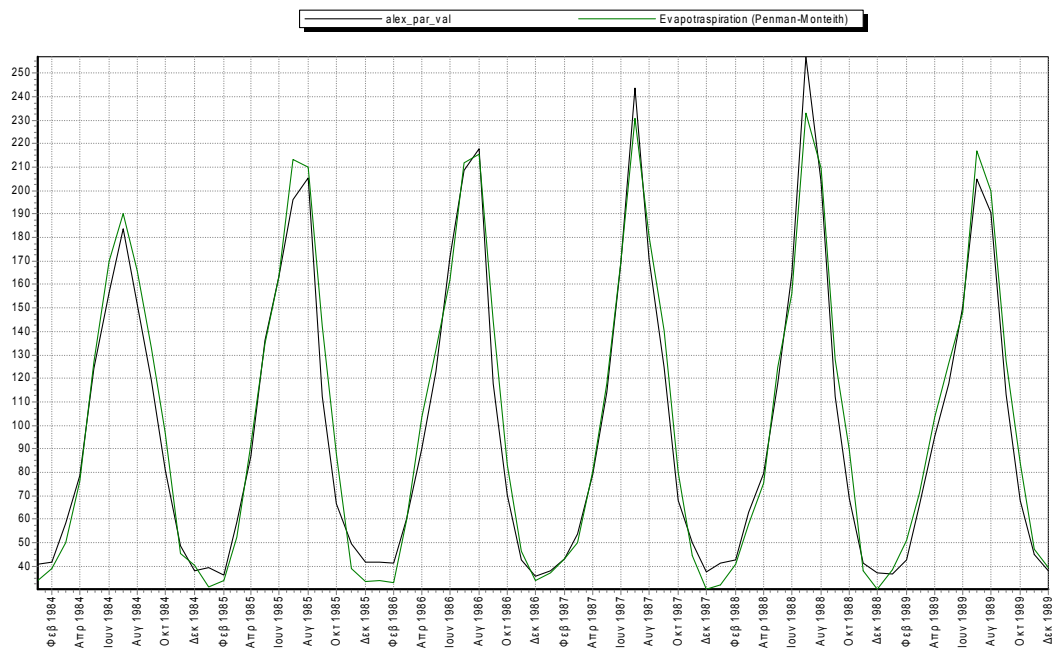


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό του Αγρινίου

Αλεξανδρούπολη	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000369	-0.524	0.027	97.1%	97%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000571	0	0.02521	96%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000624	0	0.02344	95.7%	-

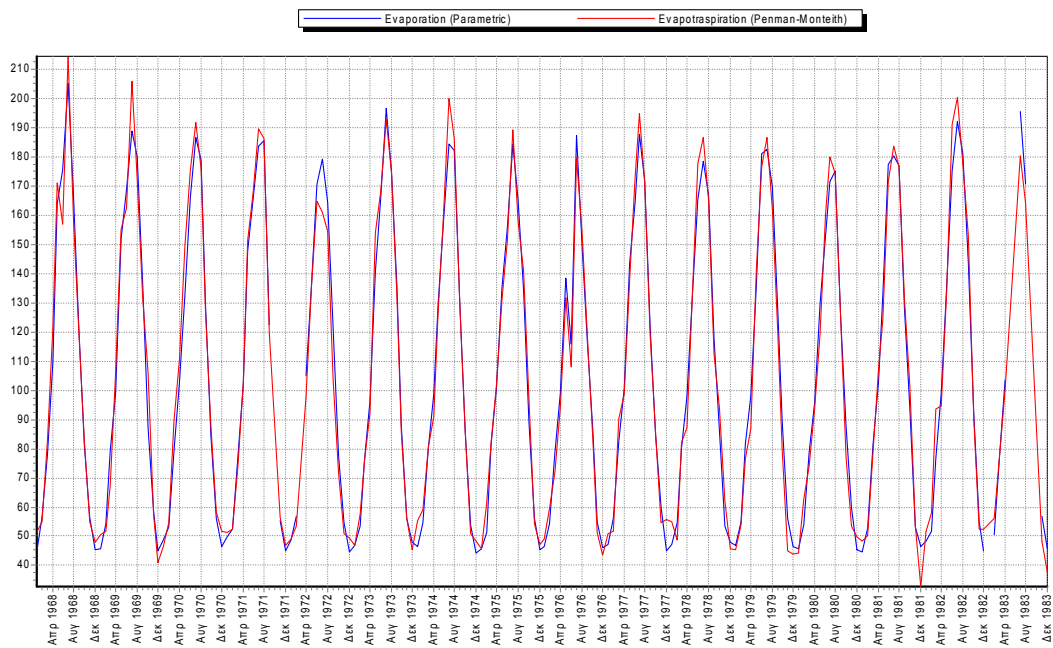


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης

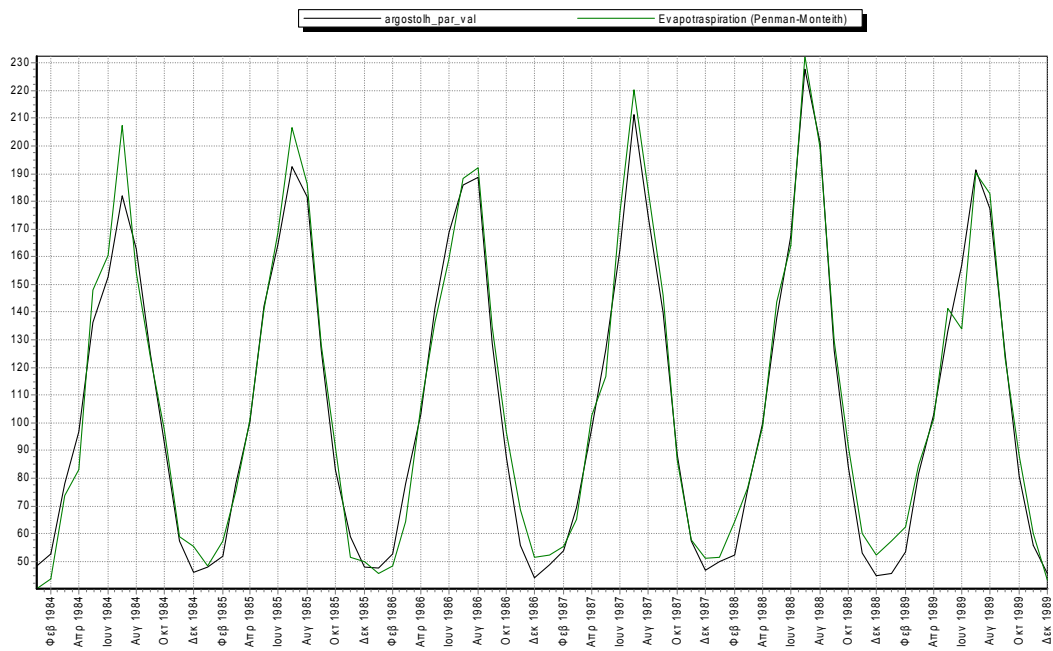


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Αλεξανδρούπολης

Αργοστόλι	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0,0000548	-0,22	0,0234	98.2%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000635	0	0.02264	97.8%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000061	0	0.02344	97.8%	-

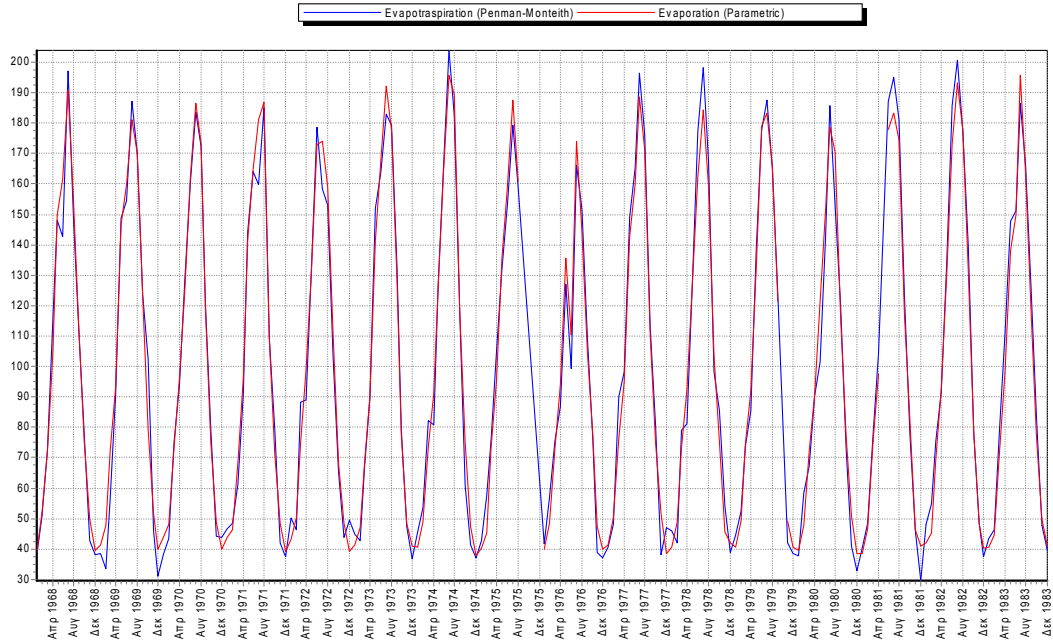


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό του Αργοστολίου

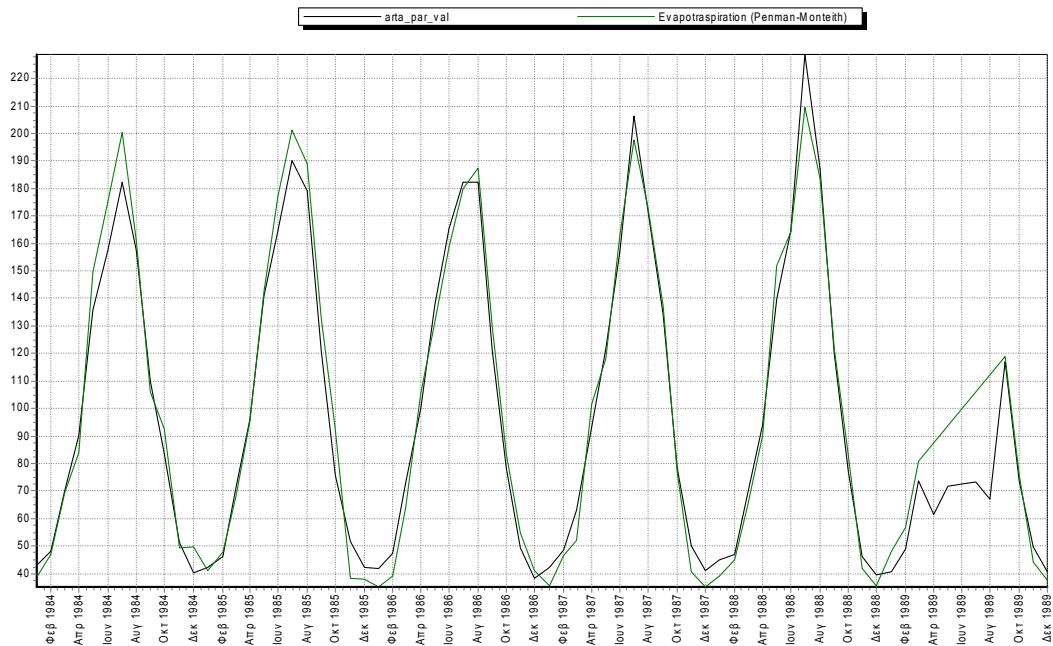


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό του Αργοστολίου

Άρτα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000516	-0.265	0.0232	98.1%	87.1%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.000058	0	0.02344	97.6%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000058	0	0.02344	97.6%	-

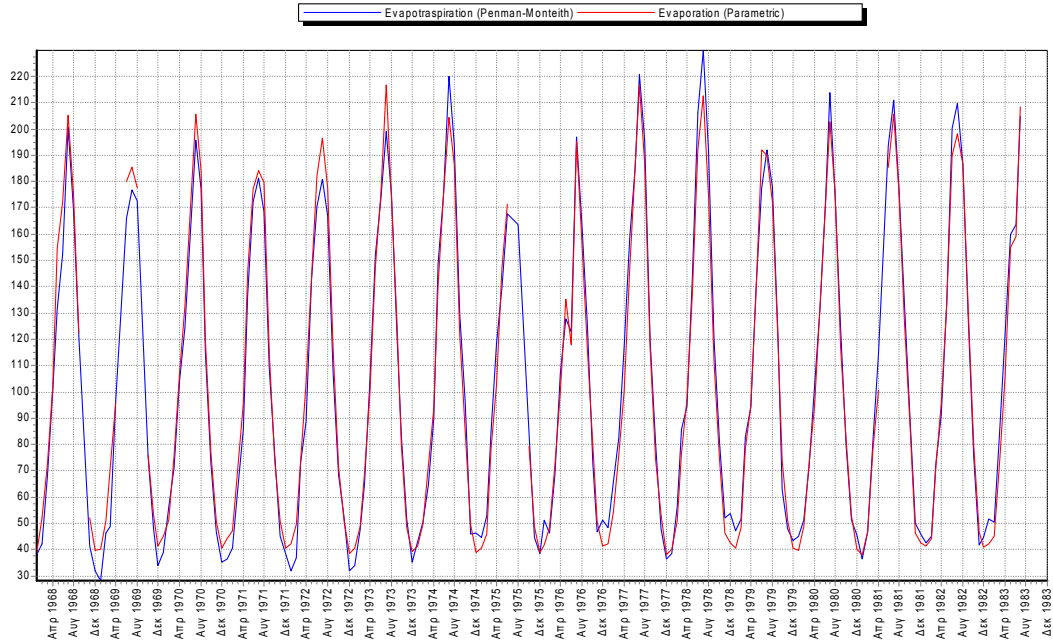


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Άρτας

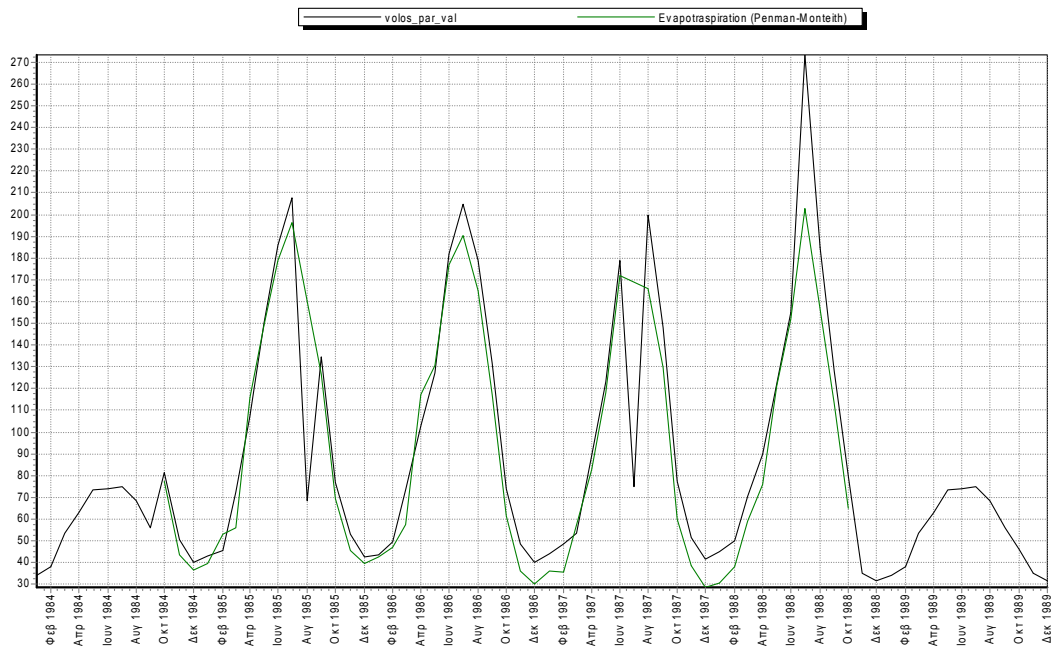


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Άρτας

Βόλος	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000526	-0.277	0.0235	98.1%	91%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000636	0	0.02251	97.9%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000606	0	0.02344	97.7%	-

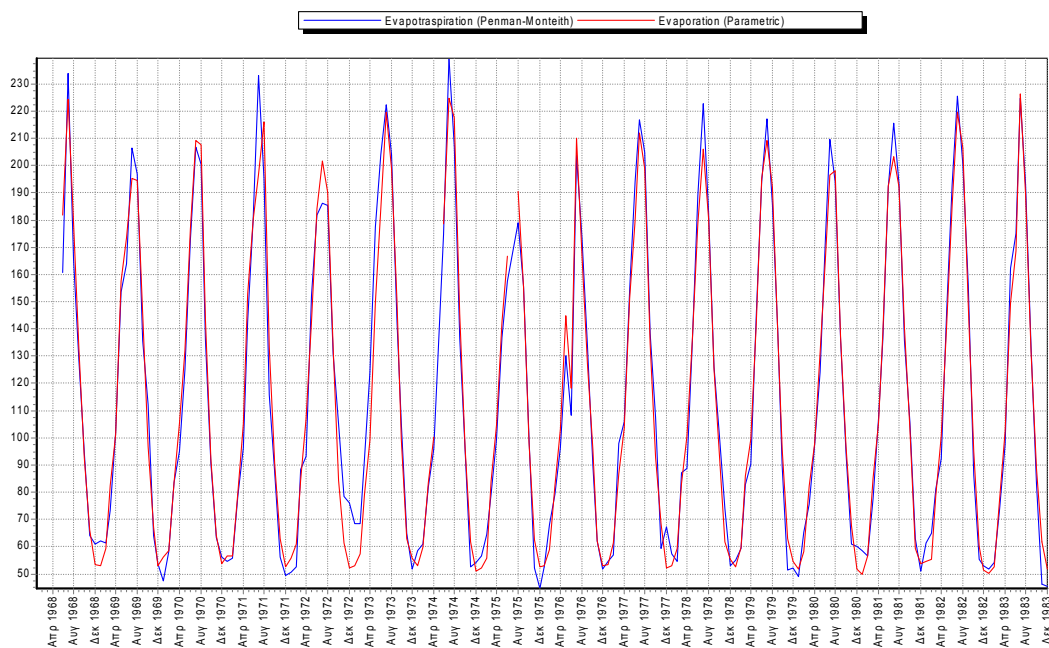


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό του Βόλου

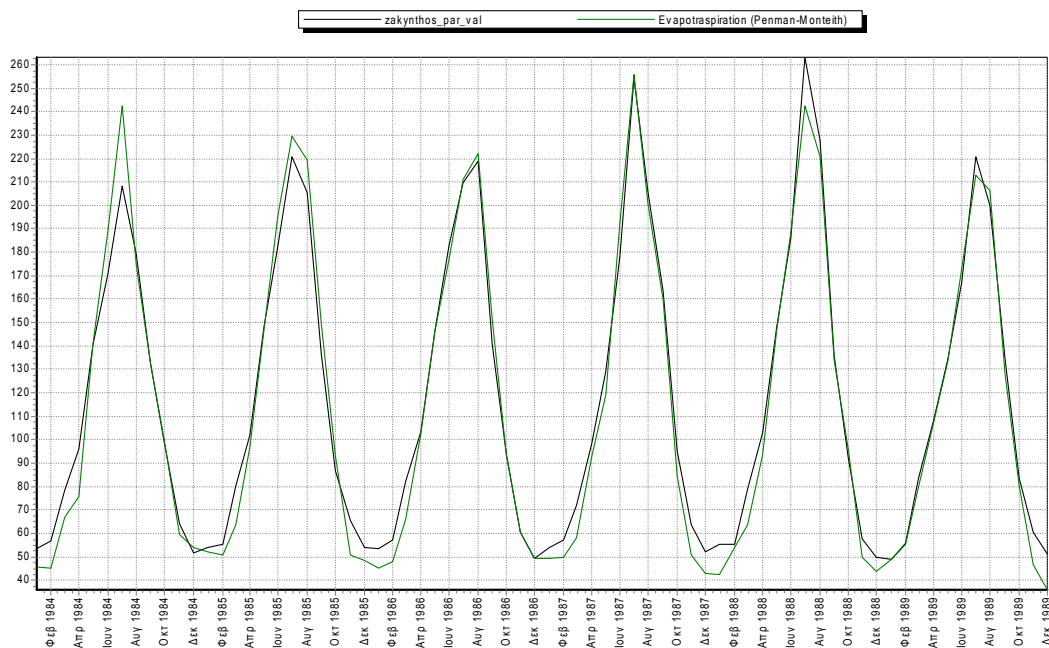


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό του Βόλου

Ζάκυνθος	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000478	-0.444	0.0247	97.4%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000653	0	0.02336	96.5%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000065	0	0.02344	96.5%	-

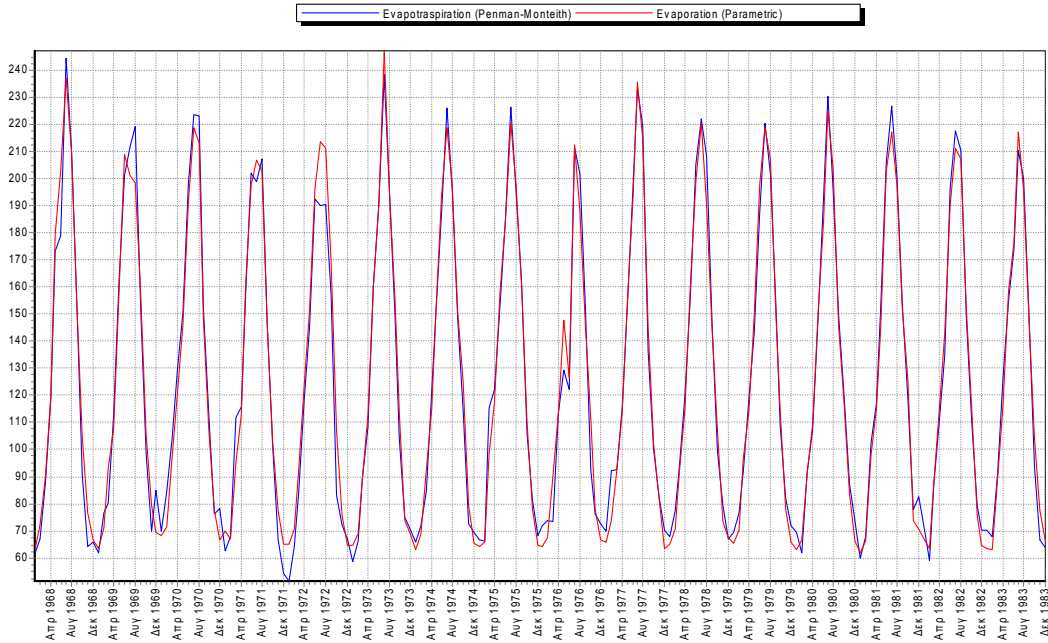


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Ζακύνθου

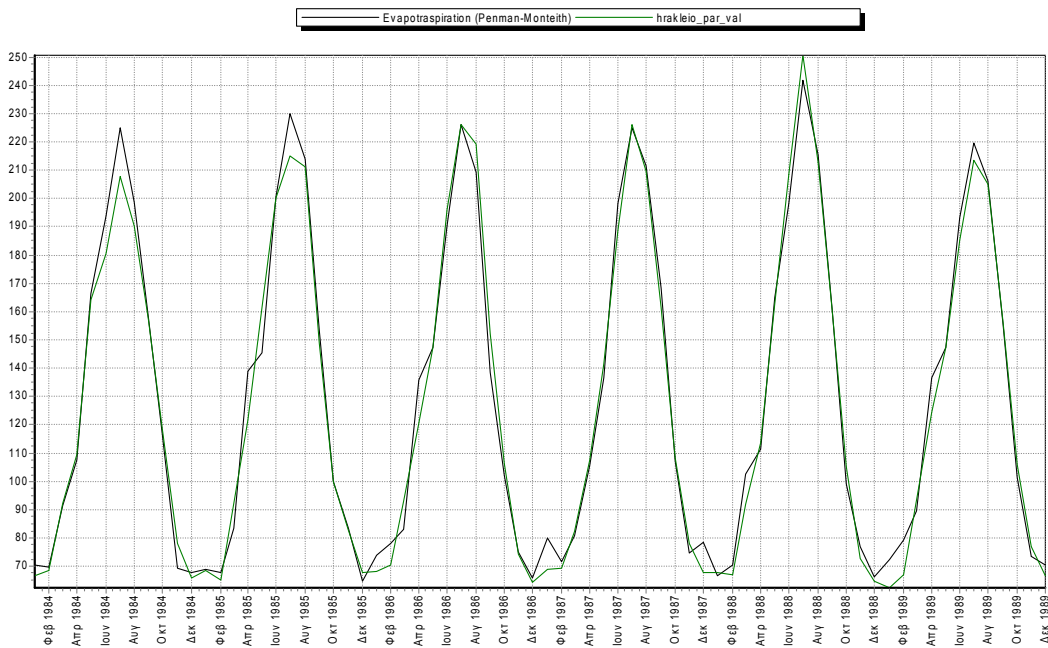


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Ζακύνθου

Ηράκλειο	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0,0000437	-0,685	0,0252	98%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000725	0	0.02253	95.9%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000694	0	0.02344	95.8%	-

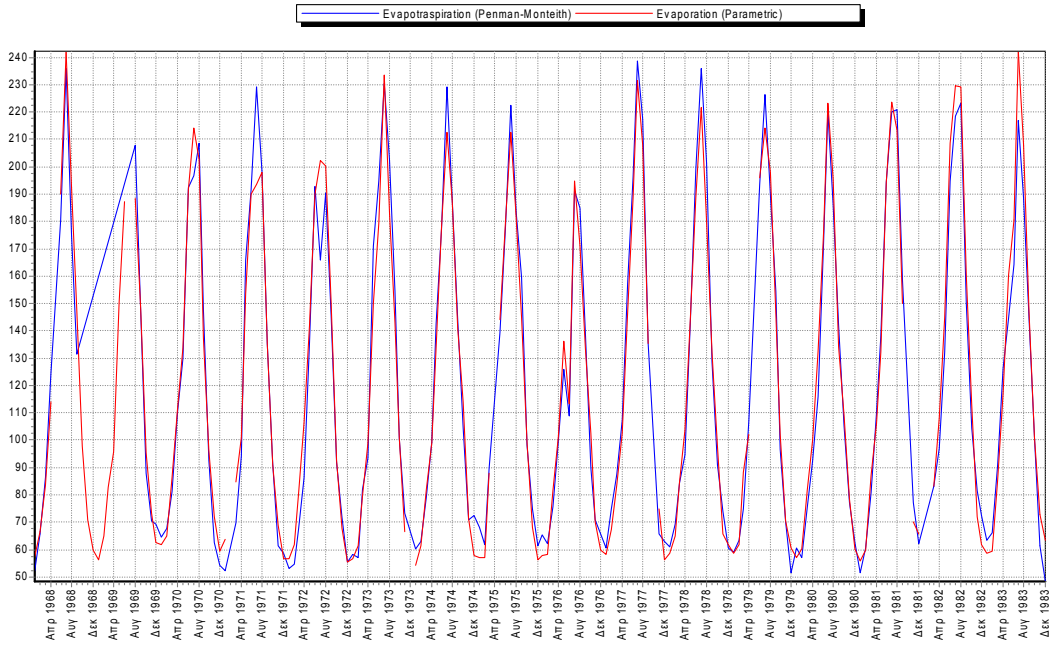


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό του Ηρακλείου

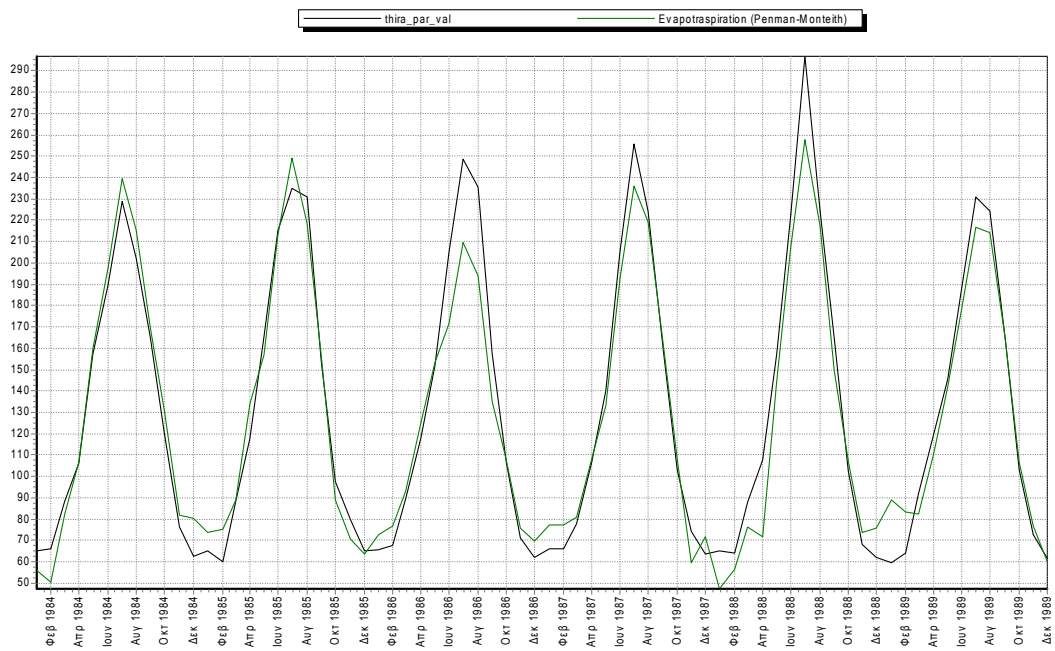


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό του Ηρακλείου

Θήρα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.00004	-0.655	0.0273	97.1%	94%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.000066	0	0.02486	95%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000071	0	0.02344	94.9%	-

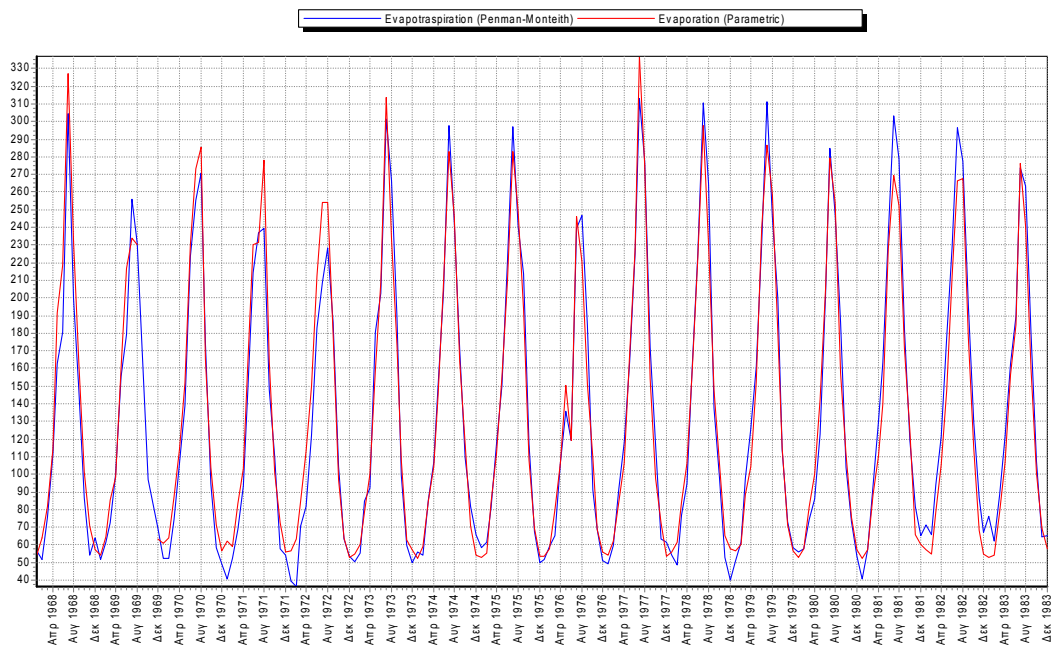


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Θήρας

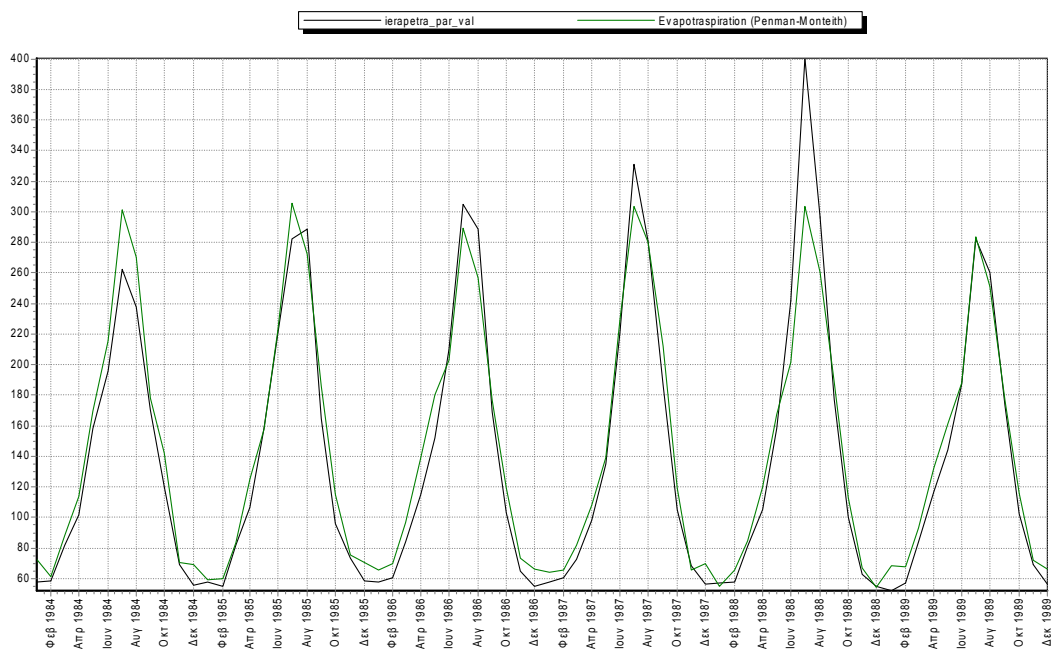


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Θήρας

Ιεράπετρα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000407	-0.413	0.028	96.2%	94%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000547	0	0.0274	95.2%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000722	0	0.02344	91.8%	-

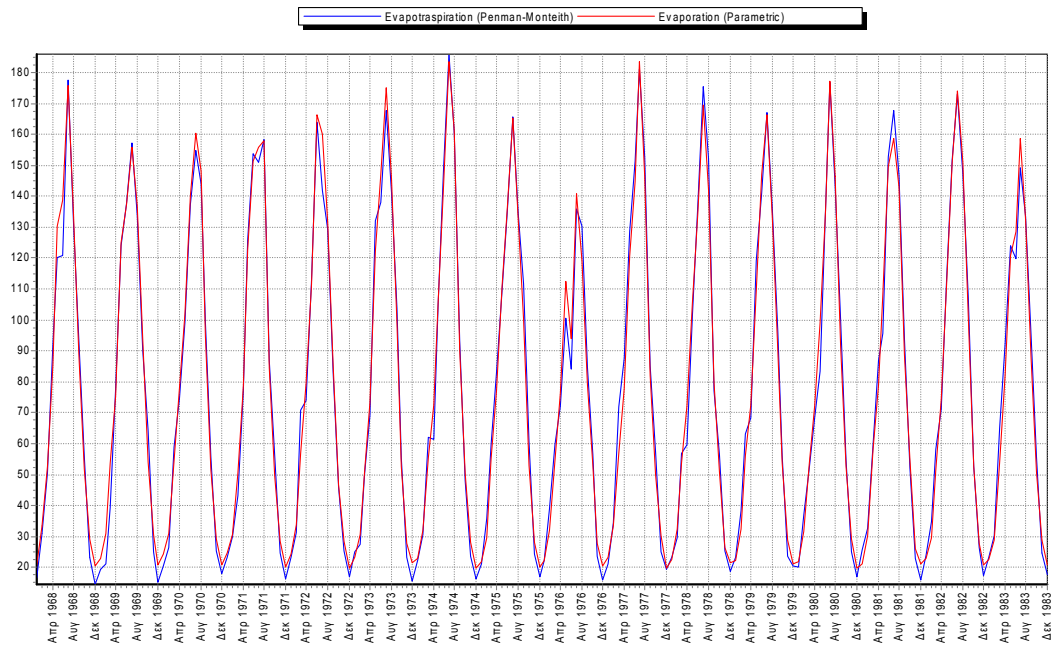


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Ιεράπετρας

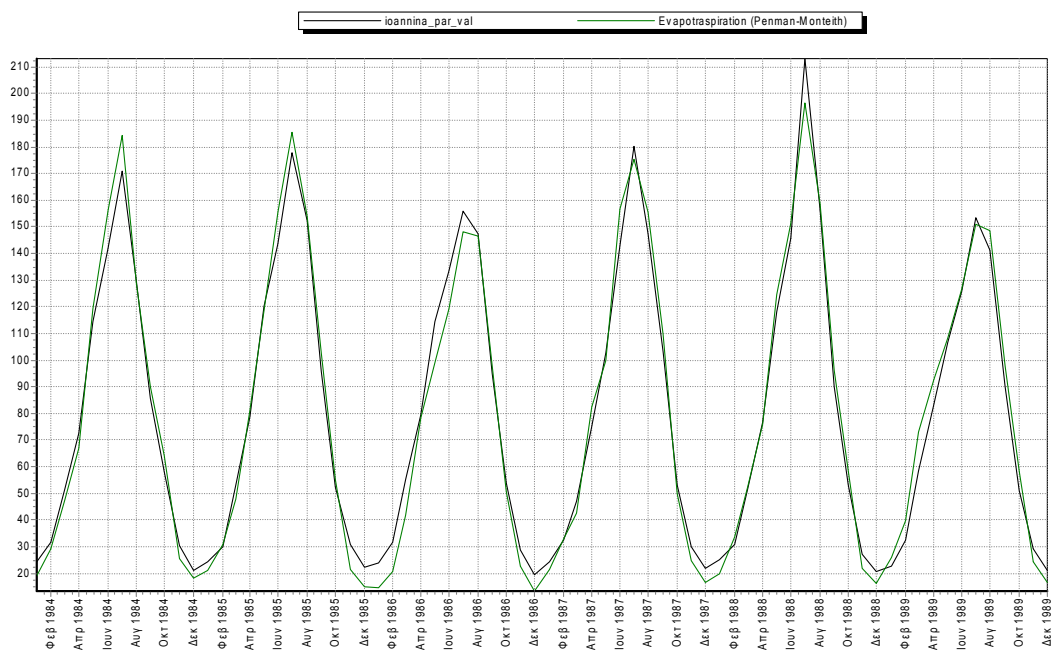


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Ιεράπετρας

Ιωάννινα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000578	0.227	0.0246	98.7%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000481	0	0.02595	98.3%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.000054	0	0.02344	97.7%	-

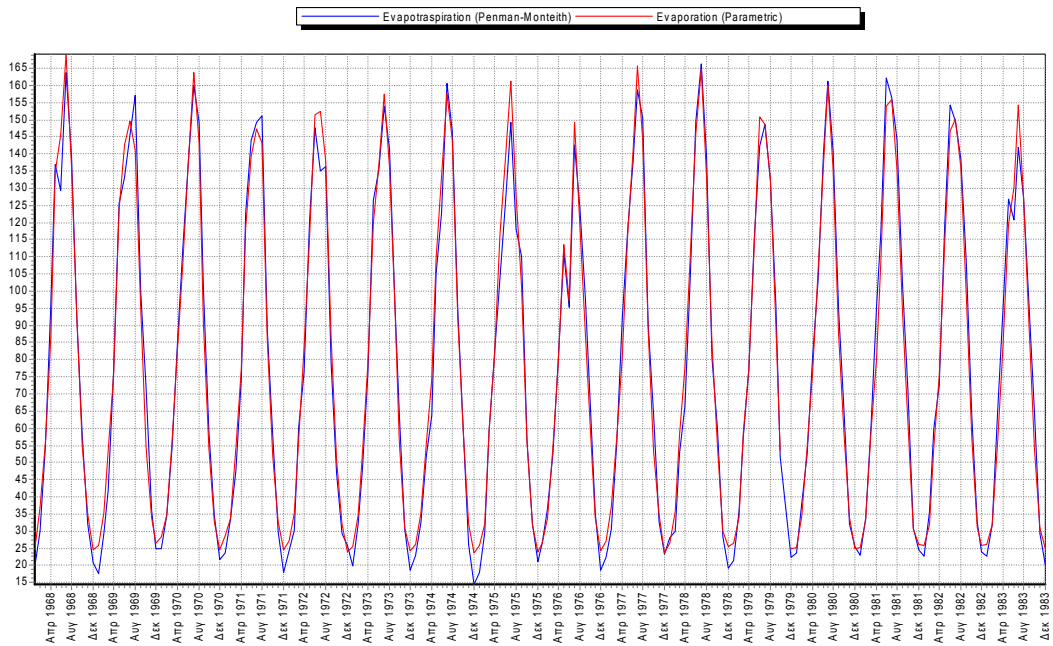


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό των Ιωαννίνων

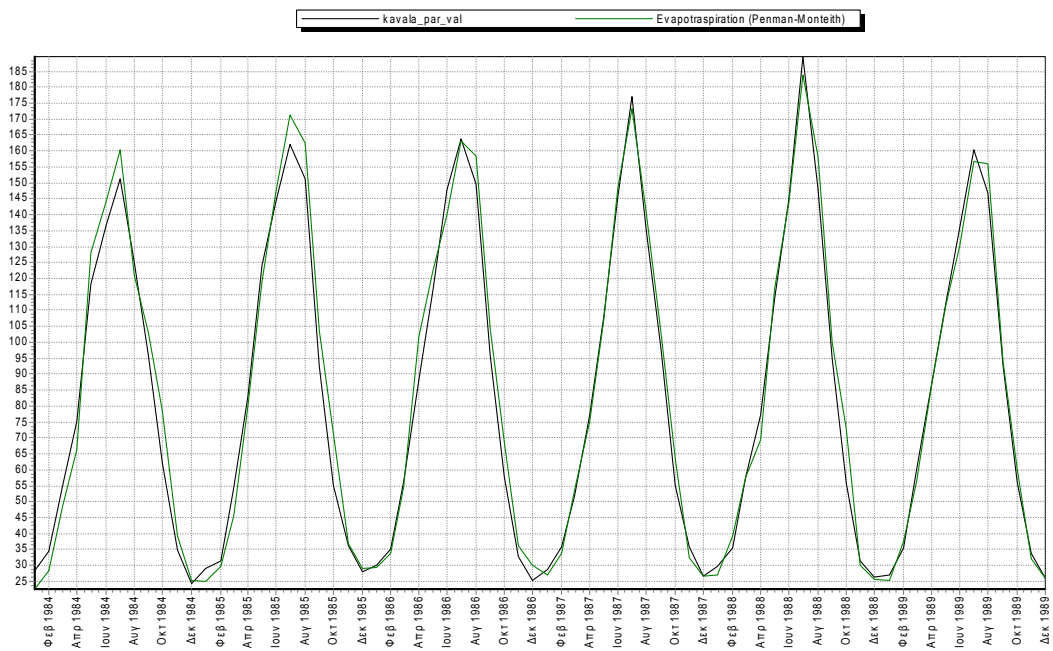


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό των Ιωαννίνων

Καβάλα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000537	-0.002	0.0233	98.3%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000582	0	0.0237	98.2%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000534	0	0.02344	98.2%	-

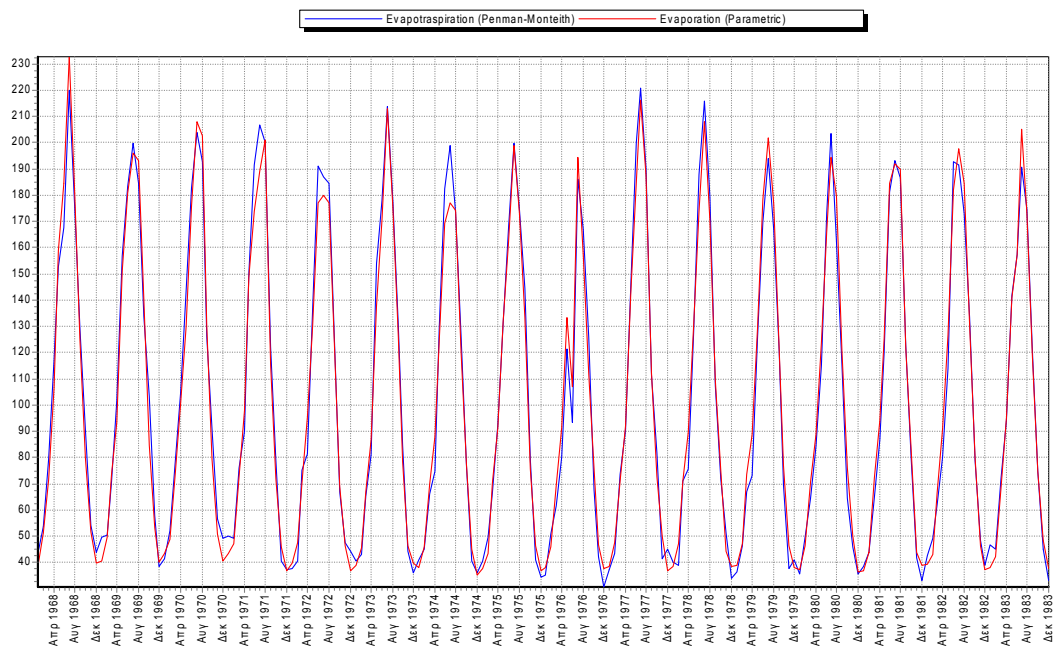


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Καβάλας

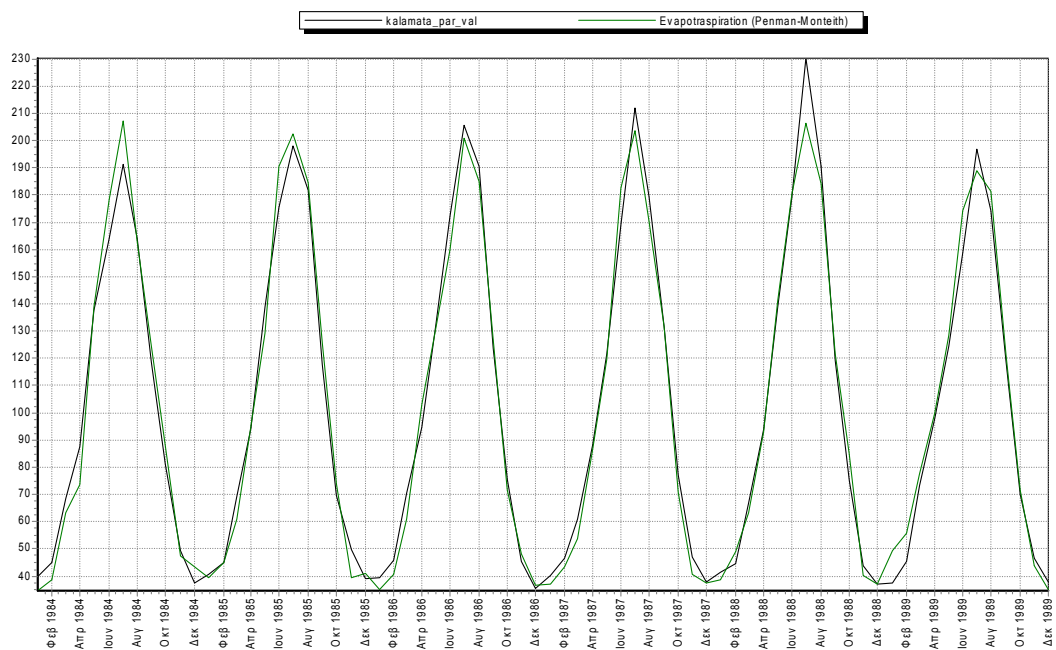


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Καβάλας

Καλαμάτα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000526	-0.064	0.0253	98.3%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000553	0	0.02512	98.3%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000607	0	0.02344	97.9%	-

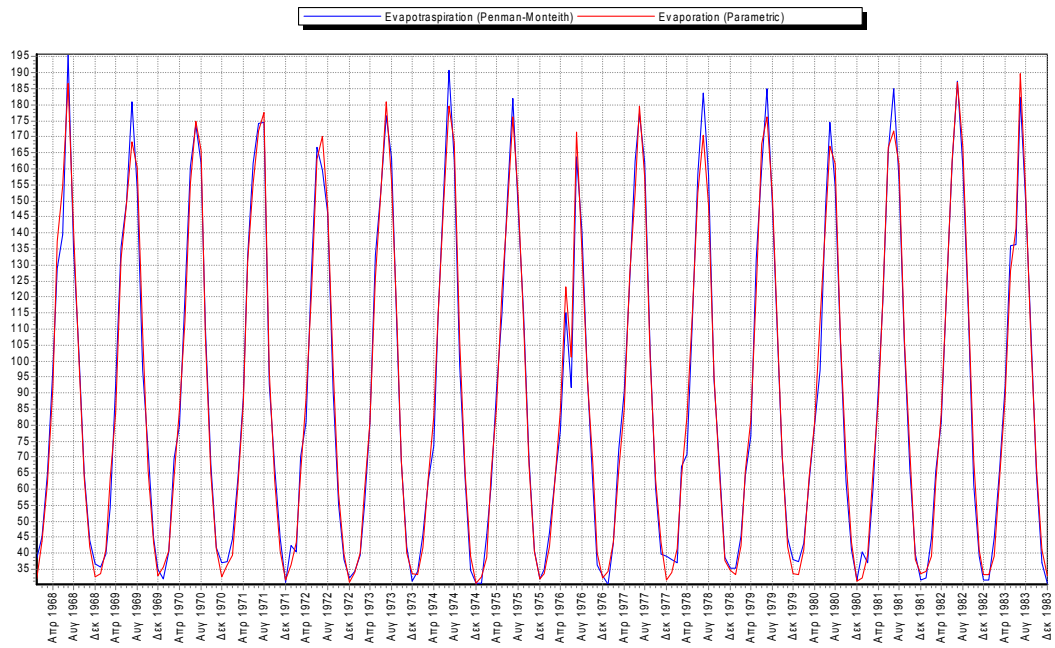


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Καλαμάτας

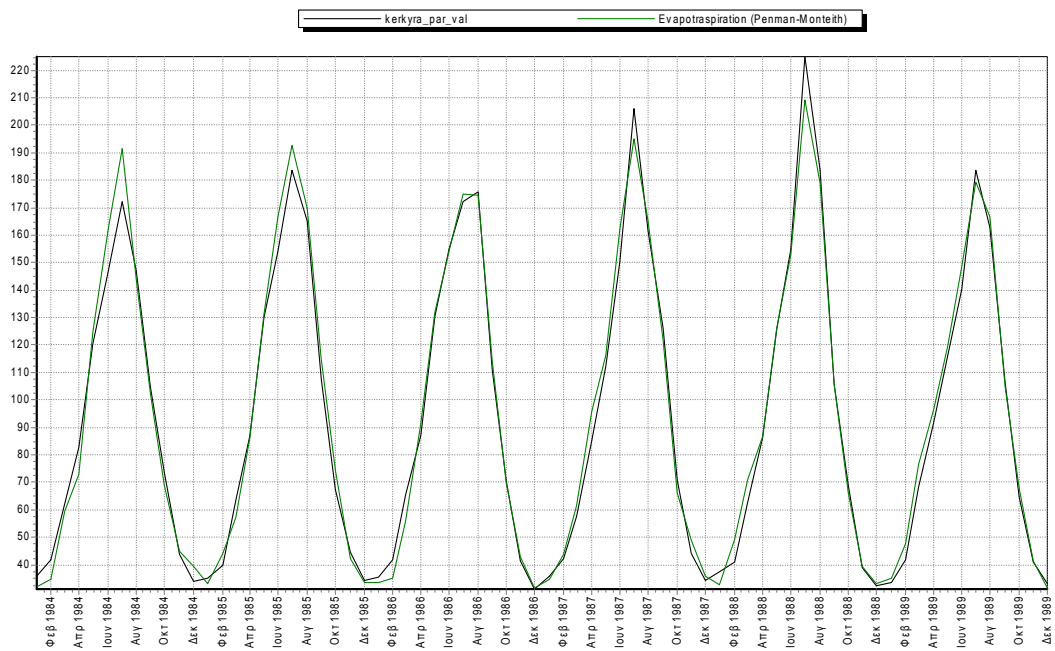


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Καλαμάτας

Κέρκυρα	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000501	-0.075	0.0242	98.9%	99%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000528	0	0.02404	98.9%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000544	0	0.02344	98.8%	-

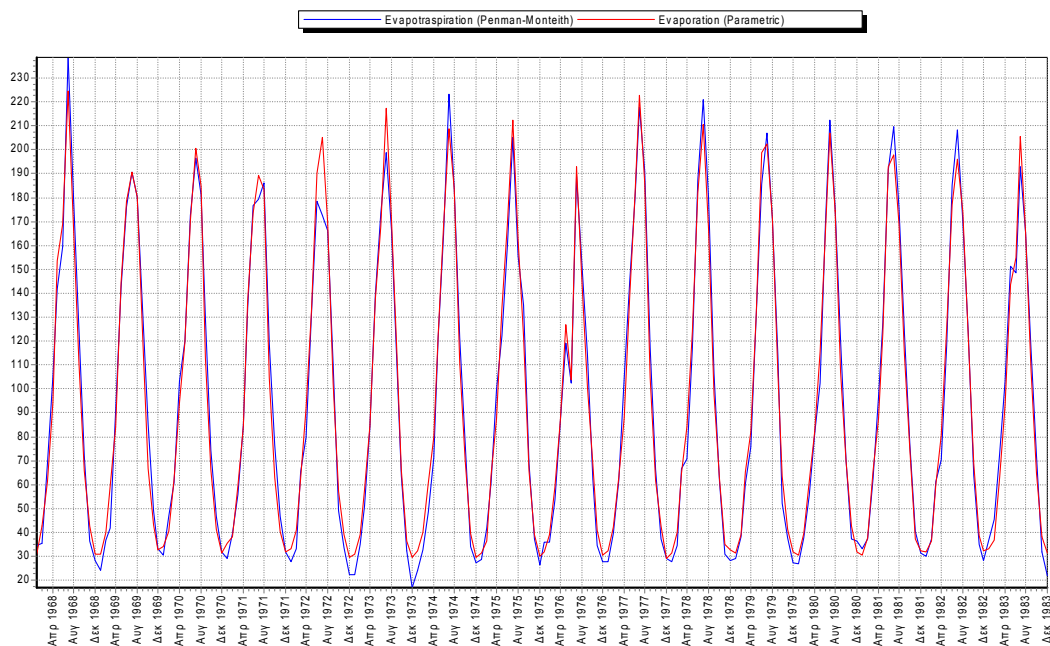


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Κέρκυρας

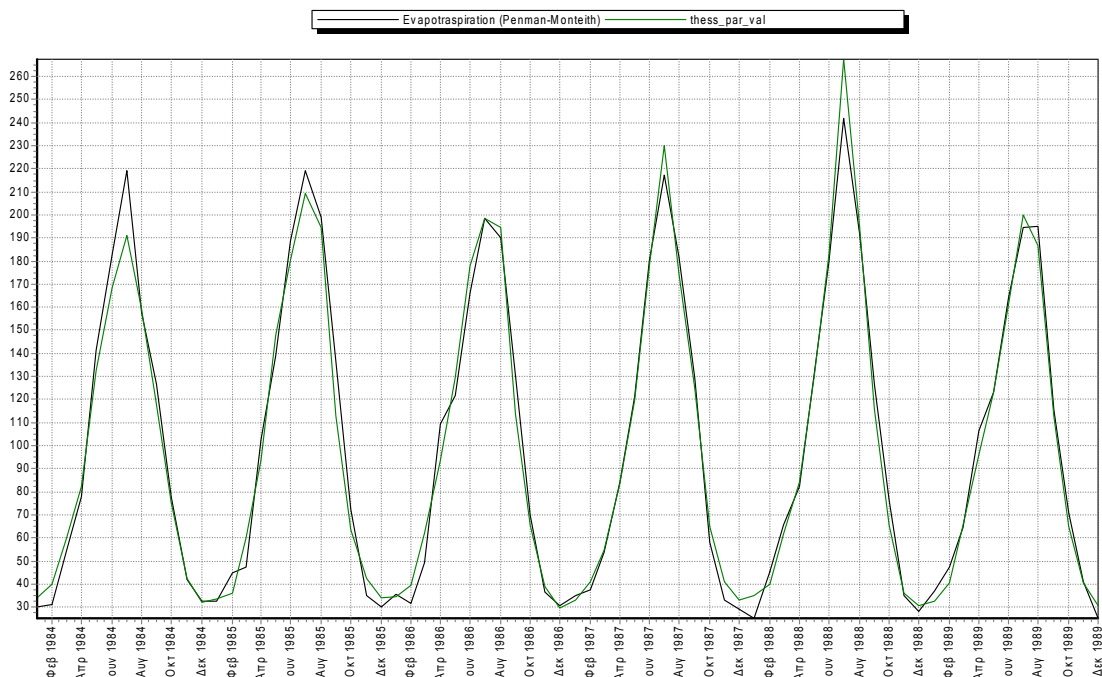


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Κέρκυρας

Θεσσαλονίκη	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0.0000485	-0.186	0.0256	98.3%	98%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000552	0	0.02514	98.2%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.0000607	0	0.02344	97.9%	-

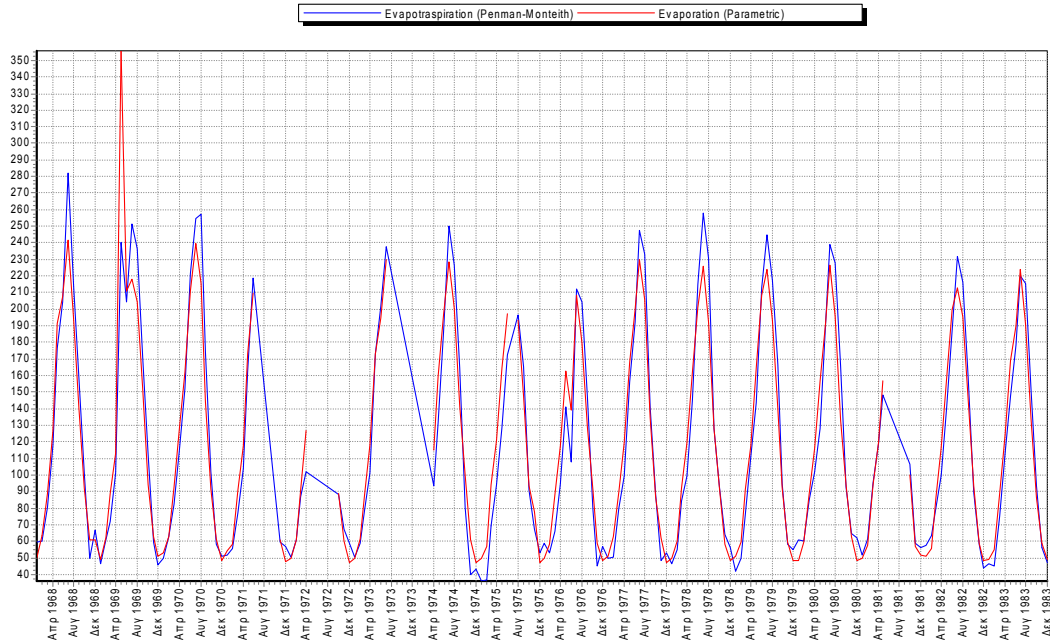


Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Θεσσαλονίκης

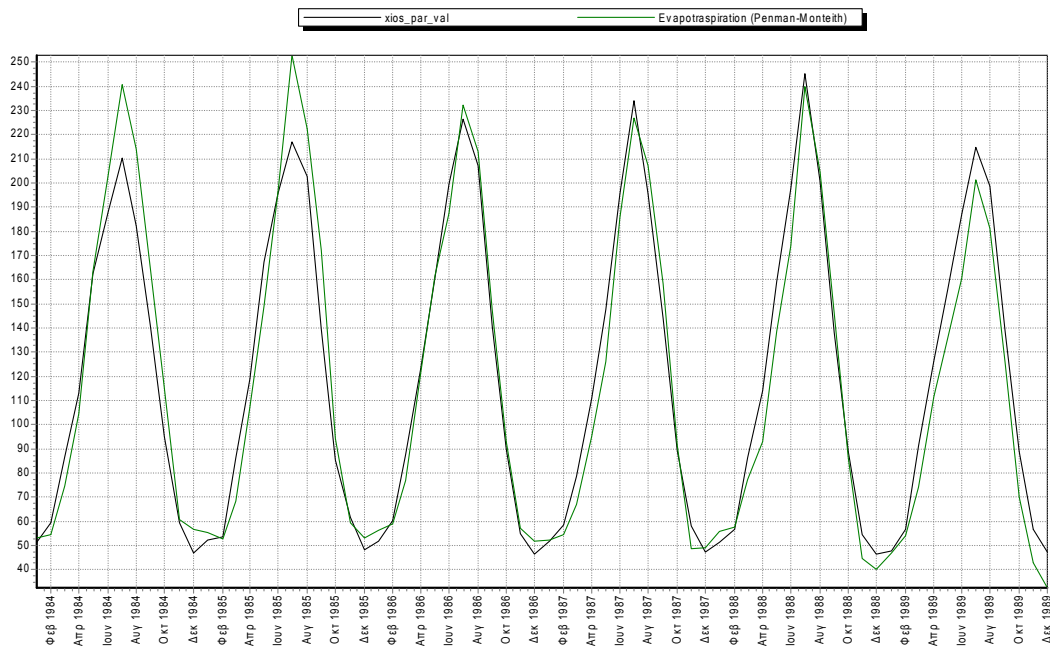


Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Θεσσαλονίκης

Χίος	a	b	c	Rcalibration	Rvalidation
Αρχική	0,00007	-0,12	0,022	91.9%	95,3%
1 ^η Βελτιστοποίηση	0.000077	0	0.02168	92.7%	-
2 ^η Βελτιστοποίηση	0.00007	0	0.02344	91.5%	-



Αποτελέσματα βαθμονόμησης για το σταθμό της Χίου



Αποτελέσματα επαλήθευσης για το σταθμό της Χίου